

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

V. N. Mineev, A. I. Funtikov, Measurements of the viscosity of iron and uranium under shock compression,
TVT, 2006, Volume 44, Issue 6, 943–950

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt1480>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.168

April 20, 2025, 10:12:19



УДК 539.89

ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ЖЕЛЕЗА И УРАНА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

© 2006 г. **В. Н. Минеев**, **А. И. Фунтиков***Институт теплофизики экстремальных состояний РАН, Москва*

Поступила в редакцию 28.02.2006 г.

Интерес к изучению вязкости в железе и уране прежде всего был связан с изучением устойчивости движения оболочек из них к центру в сферически симметричных системах при разгоне оболочек продуктами взрыва и ударных волн. Экспериментальные измерения вязкости в области давлений от 30 до 250 ГПа были проведены методом эволюции гармонических колебаний, заданных на фронте ударной волны, распространяющейся в железе и уране. Полученные данные рассматриваются вместе с оценками термодинамического состояния вещества при ударном сжатии.

Содержание

Введение.

Постановка эксперимента.

Результаты измерений.

Данные по вязкости железа в области твердого и жидкого состояний.

Расчеты вязкости железа в применении к вопросам геофизики.

Данные по вязкости урана ударном сжатии.

Обсуждение полученных результатов.

Заключение.

Список литературы.

PACS: 67.40.Pm

ВВЕДЕНИЕ

Газодинамические исследования вязкости конденсированных веществ были начаты во ВНИИЭФ в середине 1950-х годов в связи с изучением устойчивости движения оболочек и ударных волн и развития начальных возмущений на них в виде отклонений от плоскости и сферичности [1]. В частности, в сферических устройствах, используемых для измерения ударной сжимаемости веществ в области больших давлений (так называемых взрывных лабораторных измерительных устройствах [2, 3]), подобные возмущения могли появляться из-за несовершенства системы инициирования сферического заряда взрывчатого вещества (ВВ), а также неточностей изготовления его элементов.

Экспериментальное изучение временной эволюции гармонических возмущений, создаваемых на фронте распространяющейся по исследуемому веществу ударной волны, с последующим сопоставлением результатов экспериментов с теоретическим расчетом было предложено академиком А.Д. Сахаровым в качестве метода определения вязкости веществ при ударном сжатии [4]. Экспериментальные исследования вязкости некоторых металлов, NaCl и воды были выполнены во ВНИИЭФ (г. Саров) В.Н. Минеевым, А.Г. Олей-

ником и другими. Результаты изучения развития малых возмущений на фронте ударной волны, показавшие затухание возмущений при распространении ударной волны, были опубликованы в работах [4–7]. Расчетная обработка данных проводилась совместно с Р.М. Зайделем, рассмотревшим для этого влияние вязкости на развитие возмущений в плоской ударной волне [8].

Несколько позже этот метод определения вязкости и расчеты, выполненные Зайделем, были детально проанализированы Миллером и Аренсом [9]. Рассмотрено влияние на результаты экспериментального определения вязкости граничных условий и ограничений в принятых ранее приближениях на распространение ударной волны. Решение задачи о распространении возмущений так же, как и в работе [8], проведено в приближении ньютоновской жидкости с постоянной вязкостью. Сравнение расчетных оценок вязкости для воды на основании этих двух подходов к обработке экспериментальных данных показало незначительное различие в результатах, что подтвердило обоснованность применяемого метода.

Наиболее детально исследования проводились в ударно-сжатых алюминии и свинце [4, 5]. Диапазон давлений изменялся от 31 до 250 ГПа и охва-

тывал области твердого и жидкого состояний на адиабате ударного сжатия. Для выявления влияния ударного разогрева были выполнены измерения вязкости на пористых образцах из алюминия с уменьшенной до четырех раз начальной плотностью. Ударное сжатие таких образцов позволило получить при почти одинаковых давлениях существенно более высокие температуры по сравнению со сплошными образцами.

В настоящей работе представлены неопубликованные до настоящего времени результаты измерений вязкости железа и урана при ударном сжатии, полученные во ВНИИЭФ одним из авторов данной статьи.

Физическая картина высокоскоростной ударно-волновой деформации первоначально твердого вещества имеет довольно сложный характер, отличающийся при разных скоростях деформирования и состоянии, достигаемого после ударного сжатия. Динамическая вязкость вещества зависит от условий ее проявления. Действие вязкости при наличии противодействия градиенту скорости вещества аналогично диффузионным процессам, связанным с перемещением частиц и выравниванием состава при наличии градиента концентрации. Определяющими значение вязкости являются не только термодинамические параметры, но и тип течения, а также скорость деформирования. В зависимости от характера деформирования вязкость разделяется на сдвиговую и объемную. Объемная вязкость проявляется при сравнительно медленных релаксационных процессах, в частности связанных с затуханием волн. Ньютоновская сдвиговая вязкость не зависит от скорости деформирования.

Вязкость зависит также от масштабов происходящих процессов. Низкие ее значения соответствуют процессам, связанным с генерацией и релаксацией дислокаций. Высокоскоростная деформация, протекающая на макроскопическом уровне, соответствует повышению вязкости [10].

В условиях интенсивного ударного нагружения твердых тел, когда давление значительно превосходит сдвиговую прочность вещества, применимо гидродинамическое приближение, в котором не учитываются прочность и вязкость материалов. Термодинамические параметры, такие, как давление, температура и сжатие $\sigma = \rho/\rho_0$ (ρ , ρ_0 – плотности сжатого и исходного вещества), определяются из законов сохранения массы, импульса и энергии, а также из уравнения состояния вещества по кинематическим параметрам ударной волны, а именно скорости ударной волны D и массовой скорости вещества за фронтом ударной волны U :

$$P = \rho_0 U D; \quad \sigma = D/(D - U). \quad (1)$$

Как показали экспериментальные исследования напряженного состояния за фронтом ударной волны [11], еще до плавления материала в результате ударного сжатия вещество становится близким к изотропному. Прочностные свойства материалов влияют на процесс ударного сжатия, отличающийся от поведения идеальной жидкости.

При давлении ударного сжатия, превосходящем динамический предел упругости (для стали равный 1–2 ГПа), в веществе развиваются пластические деформации. Ударная волна является генератором дислокаций, которые определяют вязкопластическую деформацию и скорость пластической релаксации среды. Это проявляется в изменении микроструктуры и механических свойств материалов. Результаты экспериментальных исследований показали сложный характер реологических свойств материалов при ударном сжатии [12].

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения вязкости методом изучения развития малых возмущений на фронте ударной волны в железе и уране проведены на плоских и сферических сходящихся ударных волнах.

Возмущения на плоской ударной волне в исследуемом материале задавались на передней скошенной поверхности образца в виде клина с помощью созданных на ней параллельных полостей синусоидального профиля [4]. Расстояние между ними определяло длину волны возмущений на фронте ударной волны. Измерения формы фронта ударной волны производились после ее распространения по образцу и выхода на свободную поверхность. Использование образца в виде клина позволило в одном опыте определить профиль ударной волны на разных расстояниях от начальной плоскости.

В сферическом варианте возмущения задавались аналогичным образом в виде кольцевых канавок на наружной поверхности оболочки из исследуемого материала. Изменение длины пути распространения сферической ударной волны по толщине оболочки до ее выхода на внутреннюю свободную поверхность достигалось за счет разной толщины оболочки, полученной относительным смещением центров внутренней и наружной поверхностей.

Измерения формы фронта ударной волны после ее распространения по образцу проводились по свечению в зазоре между свободной внутренней поверхностью образца и пластиной из прозрачного вещества (плексигласа). Свечение регистрировалось сверхскоростным фотохронографом. С помощью системы щелей в виде светового экрана, установленного на пластине, определялся профиль волны в разные моменты времени, отвечающие длине распространения ударной волны [4].

Искусственно задаваемые возмущения, характеризующиеся периодичностью вдоль поверхности фронта ударной волны, приводили вещество за фронтом в колебательное движение. Параметры возмущения выбирались таким образом, чтобы удовлетворить используемому в [8] расчетному приближению, отвечающему условиям пластического течения без учета прочности и влияния малой вязкости на развитие возмущений

$$Pa_0/\lambda > \sigma_p, \quad 2\pi a_0/\lambda \ll 1. \quad (2)$$

Здесь a_0 – начальная амплитуда возмущений, λ – длина волн возмущений, P – давление в ударной волне, σ_p – динамический предел прочности.

Обеспечение за фронтом ударной волны для разных длин волн постоянного течения, необходимого для соответствия расчета и эксперимента, достигалось тем, что измерения для большей длины волн проводились на образцах достаточно большой толщины. Для того чтобы исключить влияние краевых условий, использовались соответственно большие по диаметру заряды взрывчатого вещества и исследуемые образцы.

Возмущенное течение вещества на фронте ударной волны, отвечающее высокоскоростной деформации, характеризуется соотношениями для деформации и скорости деформации [4]

$$\varepsilon = 2\pi a_0/\lambda \quad d\varepsilon/dt = 4\pi^2 a_0 D/\lambda^2. \quad (3)$$

В проведенных экспериментах деформация составляла $\varepsilon = 20\text{--}140\%$, а $d\varepsilon/dt = (1\text{--}6) \times 10^5 \text{ c}^{-1}$.

В экспериментах с разными длинами волн возмущений λ проводилось полное геометрическое моделирование распространения ударных волн в подобных условиях, отличающихся по масштабу, включая выполнение соотношения $2\pi a_0/\lambda = \text{const}$.

В плоском случае длина волн возмущений составляла $\kappa = 10$ и 20 мм, в сферическом – изучалось распространение возмущений гармоники $n = 30$. Во всех случаях начальная амплитуда возмущений определялась как $0.1a_0/\lambda$. Геометрическое подобие использовалось для исключения методических погрешностей. В плоском случае коэффициент подобия был равен двум. В сферическом случае использовались геометрически подобные взрывные лабораторные измерительные устройства [2], в которых заряды ВВ имели размеры $R_\phi = 220$ и 325 мм. Ударная волна в исследуемых материалах создавалась ударом стальной оболочки.

Было показано, что экспериментальные распределения амплитуды возмущений на фронте ударной волны в зависимости от приведенного пути распространения ударной волны $x = s/\lambda$ (s – путь, пройденный волной) качественно имели тот же характер, что и в расчете [8]: амплитуда возмущений затухала, меняя при этом несколько раз свой знак. В то же время было обнаружено, что кривые затухания амплитуды возмущений $a(x)/a_0$ для

Результаты измерений вязкости в железе и уране при ударном сжатии

Вещество	№	Геометрия опыта	P , ГПа	σ	T , К	η , кПа с
Fe	1	плоская	31	1.185	530	2 ± 0.5
U	1	плоская	43	1.229	870	14 ± 2
	2	сферическая	160	1.498	5450	< 4
	3	сферическая	250	1.614	8800	< 6

разных значений длин волн λ и параметра $2\pi a_0/\lambda$ в координатах x смещены по фазе. Расчетный анализ [8] показал, что наличие сдвига фаз, определяемого смещением пересечения отношения a/a_0 с осью абсцисс, при полном геометрическом моделировании соответствует проявлению вязкости. Величина сдвиговой вязкости в этом случае может быть рассчитана по сдвигу фаз для разных длин волн $\Delta x = x_{02} - x_{01}$

$$\eta = \rho D \Delta x / k (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2), \quad (4)$$

где ρ – плотность за невозмущенным фронтом ударной волны, D – его волновая скорость. Параметр k находился из регрессионного анализа данных $x_{0i} = f(1/\lambda_i, a_{0i}/\lambda_i)$, представленного в [4]. Полученные распределения изменения амплитуды возмущений на фронте ударной волны от приведенного пути для железа и урана имели тот же вид, что и зависимости для результатов измерений у других материалов [4, 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения вязкости железа (сталь 3 с малым содержанием примесей) были проведены при давлении ударной волны 31 ГПа, урана – в диапазоне давлений от 43 до 250 ГПа. Результаты экспериментов в виде значений коэффициентов динамической вязкости стали и урана, а также основных термодинамических параметров этих веществ при ударном сжатии, полученные по данным измерений в серии из трех–четырёх опытов, приведены в таблице.

Для оценки параметров ударного сжатия железа использовались ударные адиабаты уравнения состояния железа [13, 14] и урана [15, 16].

Существенное уменьшение вязкости при ударном сжатии урана наблюдалось в измерениях 2 и 3 при давлениях 160 и 250 ГПа. В этих измерениях изменение амплитуды возмущений на фронте ударной волны в пределах точности эксперимента не зависело от длины волны возмущений, что указывало на резкое уменьшение вязкости [5]. Так как предельные возможности регистрации возмущений соответствовали условию $\Delta x < 0.02\text{--}0.03$, то для данных значений вязкости указаны возможные верхние пределы.

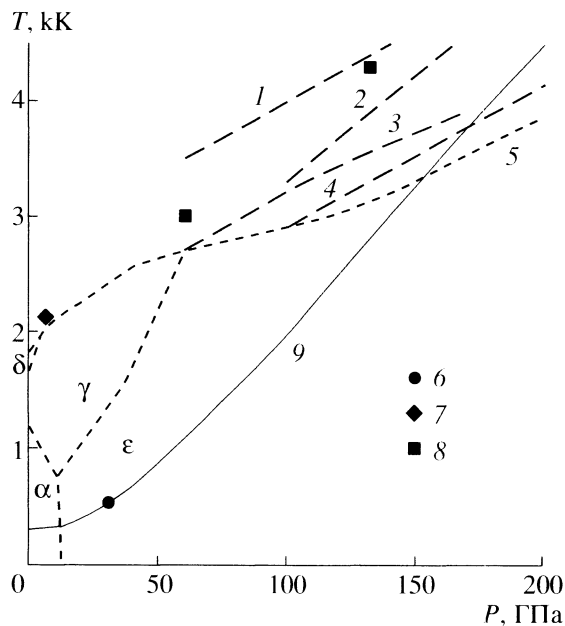


Рис. 1. Фазовая диаграмма железа: 1–4 – расчетные кривые плавления (1 – по данным [23], 2 – [35], 3 – [17], 4 – [34]); 5 – фазовые границы и кривая плавления по данным [31]; 6–8 – параметры T – P в точках измерения и расчета вязкости (6 – настоящая работа, 7 – эксперимент [39, 40], 8 – расчет [42]); 9 – ударная адиабата [17].

Данные по вязкости железа в области твердого и жидкого состояний. Фазовая диаграмма и кривая плавления железа в области высоких давлений выше тройной точки γ – ϵ – l остается достаточно неопределенной [17]. Выполненные в 90-х годах исследования кривой плавления и фазовой диаграммы железа в условиях статического сжатия в алмазных наковальнях с применением лазерного нагрева проводились при давлениях до 200 ГПа и температурах почти до 4000 К [18, 19]. При этом было обнаружено значительное расхождение с данными ударно-волновых измерений [20–22] и результатами расчетов [23]. Последующие дифракционные измерения структуры твердых фаз железа при сжатии показали, что имел место фазовый переход из области твердых фаз γ (гцк) и ϵ (гпу) в новую β -фазу, определенную как двойная гексагональная плотная упаковка в работах [24, 25] или как орторомбическая структура в [26]. Однако дальнейшие исследования фазовой диаграммы в этой области [27] не выявили наличия стабильной β -фазы, что согласуется с результатами других измерений, в частности с данными [28].

Область γ -фазы на фазовой диаграмме железа и соответственно кривая плавления γ -фазы, по-видимому, достаточно хорошо определены как в статических условиях [29], так и измерениях, выполненных при ударном сжатии [30]. Тройная точка может быть установлена по данным [28], отвечающим давлению 60 ГПа и температуре 2800 К. Ре-

зультаты экспериментальных исследований фазовой диаграммы и кривой плавления железа анализировались в [17, 31].

В области давлений выше 200 ГПа кривая плавления была определена по ударно-волновым измерениям скорости звука за фронтом ударной волны [20], которые уточнялись в [32], и температуры на фронте ударной волны [21, 22]. Те и другие данные имеют погрешности, связанные с неточностями определения тепловых составляющих уравнения состояния железа в первом случае и методическими неопределенностями введения поправок на результаты измерений во втором, что не согласуется с данными статических измерений [31].

Положение тройной точки γ – ϵ – l как исходной для кривой плавления в области более высоких давлений было использовано в работе [17] для оценки кривой плавления по данным измерений давления, отвечающего плавлению при изэнтропическом расширении из состояния на ударной адиабате [33].

На фазовой диаграмме (рис. 1) показаны кривая плавления железа и ударная адиабата, полученные в [17], а также кривые плавления по расчетным данным [34–36]. Измерения вязкости (точка 1 таблицы) соответствуют области ϵ -фазы. Начало плавления на адиабате ударного сжатия оценивается при давлении $P \sim 200$ ГПа [32].

Результаты измерения сдвиговой вязкости железа в области жидкого состояния в статических условиях получены в основном методом Стокса [37]. В частности, в [38] диапазон давлений составлял 2–7 ГПа при температурах 1970–2140 К, т.е. отвечал состояниям несколько выше кривой плавления (точка 2 рис. 1). В экспериментах в расплаве железа измерялась скорость падающего шара, обычно изготавливаемого из платины, вольфрама или иридия. Значения вязкости по методу Стокса рассчитывались по соотношению

$$\eta = 2wgr^2\Delta\rho/9V, \quad (5)$$

в котором r – радиус шара, V – скорость падения, g – ускорение силы тяжести, $\Delta\rho$ – разность плотностей шара и образца, w – поправка на соотношение между размерами шара и диаметром образца.

Для зависимости вязкости от температуры и давления использовалось соотношение для энергии активации аррениусовского типа, в котором

$$\eta = \eta_0 \exp\{E_{\text{act}}/kT\}, \quad (6)$$

$$E_{\text{act}} = E_{\text{act}0} + PV_{\text{act}}. \quad (7)$$

Здесь $E_{\text{act}0}$ – энергия активации при нормальном давлении, V_{act} – активационный объем.

Начальное значение вязкости для жидкого железа $\eta_0 = 0.54 \times 10^{-2}$ Пас соответствует обобщенным данным [39], полученным при нормальном

давлении. Температурные зависимости этих данных несколько отличаются для железа с разным содержанием примесей и при малом количестве примесей соответствуют энергии активации $E_{act} \sim 2.0$ кДж/моль.

В [39] принималось, что основное влияние на вязкость оказывает давление. Вместе с тем на зависимости вязкости от давления в [40] при ~ 5 ГПа был обнаружен излом в узкой зоне изменения P , который объяснялся возможной структурной перестройкой ближнего порядка в расплаве, отвечающей структурному переходу в области твердых фаз железа в тройной точке на кривой плавления при температуре 1990 К. Дифракционные измерения показали наличие смешанных оцк- и гцк-подобных структур в расплаве железа при температурах до 2300 К и давлениях от 4 до 5 ГПа [41]. В области $P > 5$ ГПа данные измерений [39, 41] соответствуют значениям вязкости $\eta = (0.4-1) \times 10^{-2}$ Па с и параметрам (6), (7) $E_{act(0)} = 120$ кДж/моль, $V_{act} = 2.8$ см³/моль.

Расчеты вязкости железа в применении к вопросам геофизики. Физические свойства железа при высоких давлениях, включая вязкость, необходимы для решения основных задач геофизики, связанных с моделями эволюции и строения Земли, в частности ее ядра, состоящего в основном из железа. Расчеты вязкости методами молекулярной динамики по модели функционала плотности в последнее время получили значительное развитие. Первоначально эти методы, отличающиеся преимущественно подходом к описанию электронного состояния, использовались для определения структурных параметров твердых фаз железа и его кривой плавления в области высоких давлений.

Значения сдвиговой вязкости и коэффициента диффузии жидкого железа были рассчитаны для давлений и температур, соответствующих наружной и внутренней границам внешнего ядра. В расчетах [42] варьировались температуры в диапазоне 3000–8000 К и давления от 60 до 390 ГПа, перекрывающие эти параметры для внешнего ядра Земли в модели [43]. Вязкость жидкого железа, в частности на изотерме $T = 6000$ К, оценивалась в диапазоне от 2.5 до 15 мПас при изменении давления от 90 до 360 ГПа. Вблизи расчетной кривой плавления вязкость составляла 6 и 8.5 мПас для состояний $P = 60$ ГПа, $T = 3000$ К и $P = 132$ ГПа, $T = 4300$ К (точки 3 на рис. 1).

С использованием аналогичных методов молекулярной динамики в работе [44] были проведены расчеты объемной и сдвиговой вязкости жидкого железа для давлений 135 и 330 ГПа и температур 3970 и 5950 К, отвечающих значениям на границах внешнего ядра Земли в модели PREM. Расчеты показали, что во всем диапазоне давлений и температур значения сдвиговой вязкости пример-

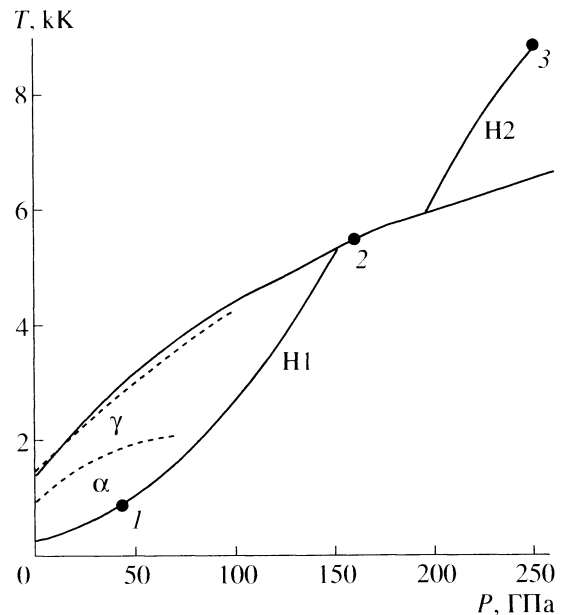


Рис. 2. Фазовая диаграмма урана: сплошные кривые – ударные адиабаты (H1, H2) и кривая плавления по данным [49], штриховые – кривая плавления и фазовая граница по данным [48]; точки 1–3 – параметры измерения вязкости.

но на порядок превосходили объемную и составляли 12–33 мПас.

Модифицированная модель уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, используемая для описания термодинамических свойств жидкостей при высоких давлениях, в частности при условиях ударного сжатия [45], была применена в [46] для расчета зависимостей вязкости от давления на кривой плавления и ударной адиабате железа. Было получено, что на кривой плавления происходит плавное увеличение вязкости от начального значения ~ 6 мПас при нормальном давлении до 30 мПас при давлении 600 ГПа. На ударной адиабате в диапазоне давлений от 300 до 600 ГПа вязкость оставалась примерно постоянной и равной 23 мПас.

Близкие значения вязкости жидкого железа были получены и в других расчетных работах, в частности в [34, 35]. Следует отметить, что, рассматривая вязкость металлов на кривой плавления, Френкель [47] указал на ее незначительное изменение с ростом давления и температуры, приводящее для условий во внешнем ядре Земли к значениям 1–10 мПас.

Данные по вязкости урана при ударном сжатии. На фазовой диаграмме $T-P$ (рис. 2) показано положение точек, в которых измерялась вязкость урана. Фазовая диаграмма и кривая плавления изучались в работе [48]. Положение ударной адиабаты урана на фазовой диаграмме определялось по данным работы [49], где приведена оценка давления начала плавления при ударном сжатии урана

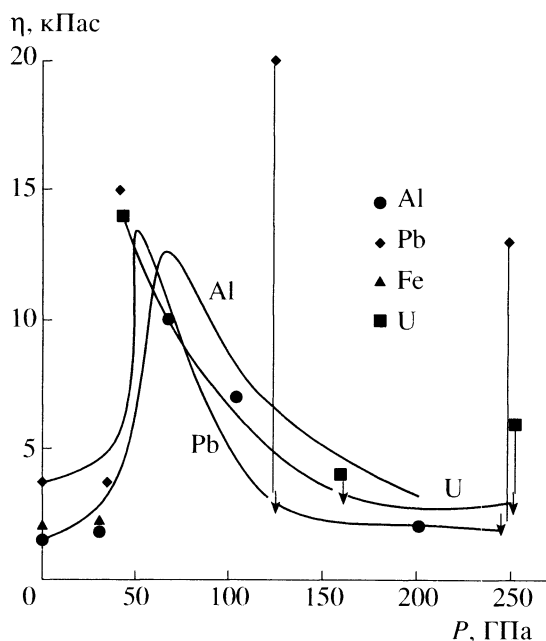


Рис. 3. Зависимости вязкости алюминия, свинца, железа и урана на ударных адиабатах.

с использованием точки пересечения ударной адиабаты с кривой плавления $P_{m1} = 152$ ГПа. Температурная зависимость на ударной адиабате соответствовала близкому к полученному в [16] уравнению состояния с учетом электронов. Кривая плавления в области давлений $P > 100$ ГПа получена экстраполяцией данных статических измерений [48]. Давление начала плавления на ударной адиабате достаточно близко к экспериментальному значению, которое приводилось в работе [50] – $P_{m1} = 145$ ГПа.

Завершение плавления при ударном сжатии в [49] оценивалось по $\Delta H_m = T_m \Delta S_{m0} - P_{m2} = 192$ ГПа или для $\Delta H_m = RT_m$ как $P_{m2} = 178$ ГПа.

Таким образом, положение отвечающих измерениям вязкости урана точек 2 и 3 из таблицы соответствует при ударном сжатии либо кривой плавления, т.е. частично жидкому, либо чисто жидкому состояниям.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следует отметить, что в области твердого состояния за фронтом УВ увеличение вязкости с ростом давления отмечено и для других металлов, а именно алюминия и свинца, исследованных в работах [4, 5] (рис. 3). Так, для алюминия коэффициент вязкости возрастал от ~ 2 кПа·с при давлении $P = 31$ ГПа до 10 кПа·с при давлении 68 ГПа, а для свинца соответственно – от 3.7 ГПа в начальной области давлений до 15 кПа·с для $P = 41$ ГПа.

Значения вязкости в случае нормального давления взяты из работы [51].

В области выше кривой плавления для всех металлов наблюдалось значительное уменьшение вязкости. В этой области различия в изменении вязкости при ударном сжатии в основном связаны с разными процессами ударного нагрева материалов [37].

Представление экспериментальных данных по вязкости алюминия при ударном сжатии в области твердого состояния [5], исходя из возможности применения соотношений аррениусовского типа для жидкого состояния [47], было связано с установлением зависимости энергии активации для кинематической вязкости $\nu = \eta/\rho$ от давления или сжатия σ . Для вязкости предлагалось использовать соотношение в виде

$$\eta(\sigma, T) = \eta_0 \sigma \exp\{E_{\text{act}}(\sigma)/RT\}, \quad (8)$$

где $E_{\text{act}}(\sigma) \sim \sigma^m$.

В [52] данные по вязкости алюминия и свинца [4, 5] во всем диапазоне ударного сжатия были аппроксимированы также соотношением (8), в котором энергия активации описывалась аналитической зависимостью в виде ступенчатой функции, что фактически отвечало двум существенно различным значениям эффективной энергии активации в области до и после плавления при ударном сжатии. Эти значения для алюминия составляли 2.1 и 56 кДж/моль, для свинца – 4.2 и 60 кДж/моль.

Такое значительное изменение энергии активации при ударном сжатии связано с тем, что в начальной области давлений разогрев незначителен, а затем с ростом давления увеличение внутренней энергии и соответственно температуры существенно опережает энергию холодного сжатия вещества. Так, при $P = 200$ ГПа доля тепловой энергии для алюминия и свинца в энергии ударного сжатия составляет около 60 и 35% соответственно. Для ударно сжатого железа доля тепловой энергии при том же давлении составляет 55% [17].

Изменение вязкости для урана в области жидкого состояния может быть представлено соотношением (8), в котором $E_{\text{act}} = 15$ кДж/моль. На рис. 3 показаны экспериментальные данные для алюминия, свинца и урана, а также соответствующие расчетные зависимости.

Результаты измерения вязкости по развитию гармонических возмущений на фронте ударной волны для всех металлов в области давлений $P = 30$ –40 ГПа соответствовали скорости деформации за фронтом de/dt , рассчитанной по соотношению (3), от 4×10^5 до 10^7 с $^{-1}$. Полученные значения вязкости при этих давлениях, соответствующие достаточно небольшому ударному нагреву, оставаясь примерно одинаковыми, не зависели от скорости деформации, т.е. вязкость являлась ньютоновской. С увеличением давления на ударной

адиабате происходил рост вязкости до значений 10–15 кПаc.

В области $d\epsilon/dt > 10^4 \text{ c}^{-1}$ по данным [53] вязкости алюминия и стали близки и слабо зависят от скорости деформации. Аналогичные изменения вязкости с ростом давления наблюдались в области твердого состояния при $d\epsilon/dt > 10^4 \text{ c}^{-1}$ в работе [54]. Уменьшение вязкости в области перехода к плавлению на ударной адиабате аналогично изменениям предела текучести и откольной прочности [55, 56].

Измерения ширины фронта ударной волны при давлениях ударного сжатия 41 и 139 ГПа в алюминии и стали позволили оценить значения вязкости, которые составили 10^2 и 4×10^2 Паc при скорости деформации $7 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ [57]. Проявление такой вязкости на фронте ударной волны соответствовало генерации дислокаций с концентрацией более 10^9 см^{-2} , в то время как в методе затухания малых возмущений на фронте ударной волны в области течения за фронтом, где уже произошла релаксация подвижных дислокаций, их образуется $\sim 10^7\text{--}10^8 \text{ см}^{-2}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений вязкости железа и урана подтвердили полученные ранее закономерности по изменению вязкости при ударном сжатии. В области твердого состояния обнаружено существенное увеличение вязкости урана до значения $\eta = 14$ кПаc при давлении $P = 43$ ГПа и дальнейшее уменьшение вязкости после плавления. В области жидкого состояния металлов при ударном сжатии снижение вязкости с ростом давления связано с ростом температуры. Полученные в измерениях верхние значения вязкости соответствуют общим закономерностям изменения вязкости в области жидкого состояния вещества, согласующимся с данными статических измерений, выполненных для железа, и расчетов вязкости в области высоких давлений.

Таким образом, изменение вязкости при ударном сжатии, связанное с конкуренцией процессов сжатия и нагрева вещества, определяется переходом твердого состояния в жидкое.

Результаты опытов показали, что относительная амплитуда возмущений a/a_0 при сохранении длины волны возмущения, колеблясь относительно оптически гладкого фронта УВ, затухает примерно в 10 раз при прохождении пути, равного $\sim 3\lambda$. Таким образом, можно свидетельствовать об устойчивости плоских и сферически сходящихся ударных волн. Отметим, что в рассмотренных сферических опытах не наблюдались эффекты перемешивания, несмотря на то что в этих устройствах происходило торможение стальной оболочки при соударении с оболочками из урана, стали и алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Урлин В.Д. и др. Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений // УФН. 1999. Т. 169. № 3. С. 323.
2. Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Крупников К.К., Панов Н.В. Взрывные лабораторные устройства для исследования сжатия веществ в ударных волнах // УФН. 1996. Т. 166. № 5. С. 575.
3. Фунтиков А.И. Взрывные лабораторные устройства для определения динамической сжимаемости пористых веществ в области давлений от 0.1 до 1 ТПа // УФН. 1997. Т. 167. № 10. С. 1119.
4. Сахаров А.Д., Зайдель Р.М., Минеев В.Н., Олейник В.Г. Экспериментальное исследование устойчивости ударной волны и механических свойств веществ при высоких давлениях // ДАН СССР. 1964. Т. 159. № 5. С. 1019.
5. Минеев В.Н., Савинов Е.В. Вязкость и температура плавления алюминия, свинца и хлористого натрия при ударном сжатии // ЖЭТФ. 1967. Т. 52. № 3. С. 629.
6. Минеев В.Н., Зайдель Р.М. Вязкость воды и ртути при ударном сжатии // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. № 6. С. 1633.
7. Минеев В.Н., Савинов Е.В. Связь вязкости с возможными фазовыми превращениями в ударно-сжатой воде // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. № 4. С. 1321.
8. Зайдель Р.М. Развитие возмущений в плоских ударных волнах // ПМТФ. 1967. № 4. С. 30.
9. Miller G.H., Ahrens T.J. Shock-wave Viscosity Measurement // Rev. Modern Phys. 1991. V. 63. № 4. P. 919.
10. Савенков Г.Г., Мецержаков Ю.И. Структурная вязкость твердых тел // ФГВ. 2002. Т. 36. № 3. С. 113.
11. Дремин А.Н., Канель Г.И. Волны сжатия и разрежения в ударно-сжатых металлах // ПМТФ. 1976. № 2. С. 146.
12. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Форттов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.
13. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Трунина Р.Ф. Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. 446 с.
14. Фунтиков А.И. Исследование железоникелевого сплава при высоких динамических давлениях: сравнение с данными для железа в области состояний ядра Земли // Физика Земли. 2001. № 9. С. 3.
15. Альтшулер Л.В., Баканова А.А., Бражник М.И. и др. Адиабата урана до давлений в 4 ТПа // Хим. физика. 1995. Т. 14. № 2–3. С. 65.
16. Фунтиков А.И. Ударное сжатие пористого урана // ТВТ. 1998. Т. 36. № 3. С. 406.
17. Фунтиков А.И. Фазовая диаграмма и кривая плавления железа, полученные по данным статических и ударно-волновых измерений // ТВТ. 2003. Т. 41. № 6. С. 954.
18. Boehler R. Temperatures in the Earth's Core from Melting-Point Measurements of Iron at High Static Pressures // Nature. 1993. V. 363. P. 534.
19. Saxena S.K., Shen G., Lazor P. Experimental Evidence for a New Iron Phase and Implications for Earth's Core // Science. 1993. V. 260. P. 1312.

20. *Brown J.M., McQueen R.G.* Phase Transition, Gruneisen Parameter and Elasticity for Shocked Iron between 77 GPa and 400 GPa // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 7485.
21. *Ahrens T.J., Hya Tan, Bass J.D.* Analysis of Shock Temperature Date for Iron // *High Pressure Res.* 1990. V. 2. P. 145.
22. *Yoo C.S., Holmes N.C., Ross M.* Shock Temperatures and Melting of Iron at Earth Core Condition // *Phys. Rev. Lett.* 1993. V. 70. № 25. P. 3931.
23. *Vocadlo L., Brodholt J., Alfe D., Price D.* Ab Initio Free Energy Calculations on the Polymorphs of Iron at Core Conditions // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2000. V. 117. P. 123.
24. *Saxena S.K., Dubrovinsky L.S., Haggkvist P. et al.* Synchrotron x -ray Study of Iron at High Pressure and Temperature // *Science.* 1995. V. 269. P. 1703.
25. *Yoo C.S., Akella J., Campbell A.J. et al.* Phase Diagram of Iron by in Situ x -ray Diffraction: Implications for Earth's Core // *Science.* 1995. V. 270. P. 1473.
26. *Andraut D., Fiquet G., Kunz M. et al.* The Orthorhombic Structure of Iron: an in Situ Study at High-temperature and High-pressure // *Science.* 1997. V. 278. P. 831.
27. *Kubo A., Ito E., Katsure T. et al.* In Situ Observation of Iron using Kawai-type Apparatus Equipped with Sintered Diamond: Absence of β Phase up to 44 GPa and 2100 K // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 3. P. 26.
28. *Shen G., Mao H.K., Hemley R.J. et al.* Melting and Crystal Structure of Iron at High Pressures and Temperatures // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 3. P. 373.
29. *Saxena S.K., Dubrovinsky L.S.* Iron Phases at High Pressures and Temperatures: Phase Transition and Melting // *Am. Mineral.* 2000. V. 85. P. 372.
30. *Ahrens T.J., Holland A., Kathleen G., Chen G.Q.* Phase Diagram of Iron, Revised – Core Temperatures // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 7. P. 54.
31. *Boehler R.* High-pressure Experiments and the Phase Diagram of Lower Mantle and Core // *Rev. Geophys.* 2000. V. 38. № 2. P. 221.
32. *Nguyen J.H., Holms N.C.* Melting of Iron at the Physical Conditions of the Earth's Core // *Nature.* 2004. V. 427. P. 339.
33. *Фунтиков А.И., Осипов Р.С., Цыганов В.А.* Изэнтропы разгрузки железа и аустенитной стали из состояния ударного сжатия при давлении 150 ГПа // *ТВТ.* 1999. Т. 37. № 6. С. 887.
34. *Laio A., Bernard S., Chiarotti G.L. et al.* Physics of Iron at Earth's Core Conditions // *Science.* 2000. V. 287. P. 1027.
35. *Belonoshko A.B., Ahuja R., Johansson B.* Quasi-*ab initio* Molecular Dynamic Study of Fe Melting // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. № 16. P. 3638.
36. *Alfe D., Gillan M.J., Price D.* The Melting Curve of Iron at the Pressure of the Earth's Core from *ab Initio* Calculations // *Nature.* 1999. V. 401. P. 462.
37. *Минеев В.Н., Фунтиков А.И.* Об измерении вязкости расплавов металлов при высоких давлениях и расчетах вязкости применительно к ядру Земли // *УФН.* 2004. Т. 174. № 7. С. 727.
38. *Rutter M.D., Secco R.A., Liu H.* Viscosity of Liquid Fe at High Pressure // *Phys. Rev.* 2002. V. 66. P. 060102.
39. *Арсентьев П.П., Коледов Л.А.* Металлические расплавы и их свойства. М.: Металлургия, 1976.
40. *Terasaki H., Kato T., Urakawa S. et al.* Viscosity Change and Structural Transition of Molten Fe at 5 GPa // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 8. P. 68.
41. *Sanloup C.F., Giyot F., Gillet P. et al.* Structural Changes in Liquid Fe at High Pressures and Temperatures from Synchrotron x -ray Diffraction // *Europys. Lett.* 2000. V. 52. P. 151.
42. *Vocadlo L., Alfe D., Gillan M.J., Price D.* The Properties of Iron under Core Conditions from First Principles Calculations // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2003. V. 140. P. 101.
43. *Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary Reference Earth Model // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1981. V. 25. P. 297.
44. *Zhang Y., Gio G., Nie G.* A Molecular Dynamics Study of Bulk and Shear Viscosity of Liquid Iron Using Embedded-atom Potential // *Phys. Chem. Minerals.* 2000. V. 27. P. 164.
45. *Медведев А.Б.* Модификация модели Ван-дер-Ваальса для плотных состояний // *Ударные волны и экстремальные состояния / Под ред. Фортова В.Е., Альтшулера Л.В., Трунина Р.Ф., Фунтикова А.И. М.: Наука, 2000.*
46. *Медведев А.Б.* Коэффициенты переноса в модифицированной модели Ван-дер-Ваальса // *ТВТ.* 1995. Т. 33. № 2. С. 227.
47. *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1945.
48. *Yoo C.S., Akella J., Moriarty J.A.* High-pressure Melting Temperatures of Uranium: Laser-heating Experiments and Theoretical Calculations // *Phys. Rev. B.* 1993. V. 48. № 21. P. 15529.
49. *Dai C., Tan H., Geng H.* Model for Assessing the Melt on Hugoniot of Metals: Al, Pb, Cu, Mo, Fe, and U // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 92. № 9. P. 5019.
50. *Lalle P., Courchinoux R.* Melting on the Hugoniot // *Shock compression of condensed matter-1995.* Ed. by Schmidt S.C., Tao W.C. N.Y.: AIP, 1996. P. 207.
51. *Степанов Г.В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсных нагружениях. Киев: Наук. думка. 1991.
52. *Огородников В.А., Садовой А.А., Тюнькин Е.С., Чулков Н.М.* О вязкости алюминия и свинца в ударно-волновых экспериментах // *ПМТФ.* 1995. № 5. С. 5.
53. *Годунов С.К., Дерибас А.А., Захарченко И.Д., Мали В.И.* Исследование вязкости металлов при высокоскоростных соударениях // *ФГВ.* 1971. № 1. С. 135.
54. *Степанов Г.В., Харченко В.В.* Особенности деформирования металлов при скоростях деформации выше 10^4 c^{-1} // *Проблемы прочности.* 1985. № 8. С. 59.
55. *Батьков Ю.В., Глушак Б.Л., Новиков С.А.* Прочность алюминия, меди и стали за фронтом УВ // *ФГВ.* 1989. Т. 25. № 5. С. 126.
56. *Огородников В.А., Иванов А.Г., Тюнькин Е.С. и др.* Зависимость откольной прочности металлов от амплитуды ударно-волновой нагрузки // *ФГВ.* 1992. № 1. С. 94.
57. *Chhabildas L.C., Asay J.R.* Rise-time Measurements of Shock Transitions in Aluminum, Copper, and Steel // *J. Appl. Phys.* 1979. V. 50. № 4. P. 2749.