

# Динамическая прочность стали 15Х2НМФА в субмикросекундном диапазоне длительностей ударно-волновой нагрузки

Г. В. Гаркушин<sup>1,2</sup>, А. С. Савиных<sup>1,2</sup>, Г. И. Канель<sup>2</sup> и С. В. Разоренов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем химической физики РАН, Проспект Академика Семенова, 1, Черноголовка 142432, Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: kanel@ficp.ac.ru

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2018 г.

**Аннотация.** Представлены результаты измерений профилей скорости свободной поверхности образцов высокопрочной конструкционной стали 15Х2НМФА, по результатам которых определены зависимости сопротивления деформированию и разрушению стали от скорости деформации. Результаты сопоставлены с подобными данными для железа в различных структурных состояниях. Найдено, что сталь 15Х2НМФА характеризуется вдвое более высокой динамической прочностью на растяжение, чем железо, при практически равных значениях динамического предела упругости. <https://doi.org/10.33849/2018122>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о соотношении динамической прочности материала с его динамическим пределом текучести важен для построения моделей и определяющих соотношений, описывающих его реакцию на ударное воздействие. Хотя во многих случаях материалы с более высокой откольной прочностью (прочностью на растяжение, реализуемой в условиях ударно-волнового нагружения) обладают и более высокими значениями динамического предела упругости, эта корреляция не универсальна. Высокоскоростное разрушение в субмикросекундном временном диапазоне представляет собой совокупность процессов зарождения, роста и слияния многочисленных несплошностей — трещин или пор. В то время как сопротивление росту несплошностей пропорционально пределу текучести материала, связь кинетики их зарождения с пределом текучести неочевидна. В связи с этим представляет интерес накопление экспериментальных данных и их сопоставление для металлических материалов с разными прочностными свойствами.

В данной работе исследовалась высокопрочная конструкционная высоколегированная сталь 15Х2НМФА, разработанная для корпусов реакторов ВВЭР–1000. Она обладает высокими прочностными свойствами и высоким уровнем вязкости разрушения. Исследование динамических прочностных характеристик стали этого класса стимулируется также необходимостью прогнозирования интенсивных ударных воздействий техногенной или террористической природы на конструкции реакторов атомных электростанций.

## 2. МАТЕРИАЛ

Химический состав стали по данным производителя НПО «Прометей» представлен в таблице 1. Образцы стали 15Х2НМФА были вырезаны из кованой и затем прокатанной обечайки толщиной 350 мм. Материал прошел закалку в воде от 1000–1020 °С с последующим отпуском при 670–690 °С в воздухе, имел практически изотропную структуру сорбит с размером зерен  $34 \pm 4$  мкм, предел прочности 740 МПа, предел текучести 640 МПа, удлинение 22.5%, сужение 80%. Измеренное значение продольной скорости звука составило 5953 м/с, что практически не отличается от скорости звука в же-

лезе. Так как доля легирующих добавок в стали, в общем, невелика, при обработке экспериментальных данных допустимо использовать модули упругости железа.

Заготовки образцов были вырезаны из обечайки лазерной резкой и представляли собой бруски с размерами 22x25x70 мм. Образцы для ударно-волновых исследований толщиной от 0.05 мм до 4 мм вырезались из одной заготовки электроэрозионным методом перпендикулярно длинной оси бруска; боковые поверхности образцов представляли собой часть боковой поверхности заготовки. Плоские поверхности образцов после электроэрозионной резки получались параллельными друг другу, достаточно гладкими и нуждались лишь в небольшой полировке.

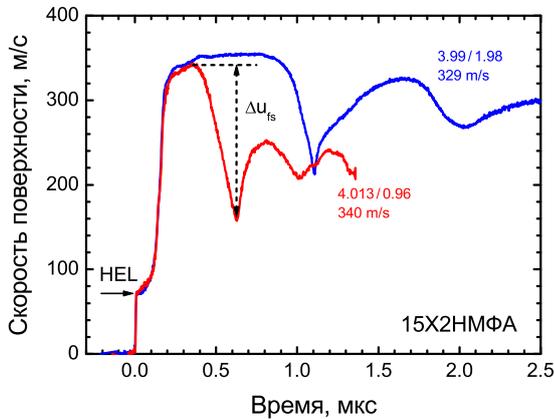
## 3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты выполнены с применением газовой пушки в качестве генератора импульсов ударного сжатия. Сжатый газ разгонял пустотелый алюминиевый цилиндр, на доньшко которого, обращенное к образцу, был наклеен диск из полиметилметакрилата толщиной 5 мм, на который в свою очередь наклеен медный ударник. Толщина ударника в зависимости от цели эксперимента варьировалась от 0.2 мм до 2.5 мм. Подложка из полиметилметакрилата обеспечивала необходимую жесткость конструкции с тем, чтобы предотвратить прогиб ударника в процессе ускорения, и обеспечивала разгрузку ударно-сжатого состояния ударника после выхода на нее ударной волны. Скорость удара составляла 340–360 м/с. Напряжение сжатия за пластической ударной волной в стальном образце при такой скорости удара составляло примерно 6.8 ГПа. Ствол и пространство вокруг образца вакуумировались.

В экспериментах электроконтактными датчиками контролировались скорость и перекоп ударника, а лазерным интерферометрическим измерителем VISAR [1] — профиль скорости  $u_{fs}(t)$  центральной точки свободной тыльной поверхности образца. Временное разрешение на профиле скорости составляло примерно 1 нс.

Таблица 1. Химический состав стали 15X2НМФА (плавочный), массовая доля элементов, %.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	S	P
0.13–0.18	0.17–0.37	0.30–0.60	1.8–2.3	1.0–1.5	0.5–0.7	0.10–0.12	<0.3	<0.02	<0.02

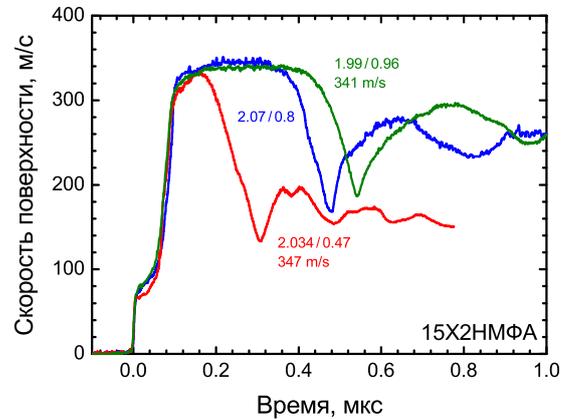


**Рисунок 1.** Профили скорости свободной поверхности образцов стали 15X2НМФА с номинальной толщиной 4 мм, полученные при ударе медной пластиной толщиной номинально 1/2 и 1/4 от толщины образца. Указаны точные значения толщин образца и ударника, а также скорость удара.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рисунке 1 представлены профили скорости свободной поверхности образцов стали 15X2НМФА толщиной 4 мм, полученные в опытах с ударниками различной толщины. На волновых профилях регистрируется выход на поверхность упругопластической волны ударного сжатия и, после циркуляции волн в ударнике, части волны разрежения. Амплитуда упругого предвестника HEL (Hugoniot elastic limit) пропорциональна величине динамического предела упругости [2–4]. Пластическая волна сжатия имеет вполне измеримое время нарастания параметров, что характерно для слабых ударных волн. Нарастание параметров в области между упругой и пластической волнами обусловлено деформационным упрочнением, а также релаксацией напряжений при высокоскоростном деформировании [3, 4]. Небольшой наклон передней части плато скорости между волнами сжатия и разрежения отчасти есть также результат релаксации напряжений и отчасти следствие многократных ревербераций упругого предвестника между свободной поверхностью и пластической ударной волной [4]. Длительность плато скорости определяется временем реверберации волн в ударнике.

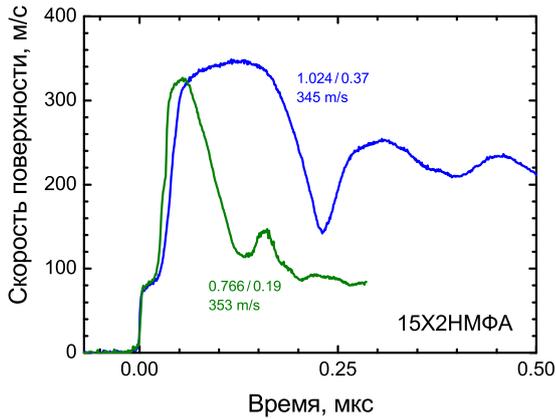
После отражения волны сжатия от свободной поверхности внутри плоского образца происходит взаимодействие встречных падающей и отраженной волн разрежения, в результате чего генерируются растягивающие напряжения и происходит откольное разрушение. Релаксация напряжений при разрушении приводит к появлению на профиле скорости свободной поверхности второй волны сжатия — так называемого откольного импульса, в которой скорость поверхности вновь воз-



**Рисунок 2.** Профили скорости свободной поверхности образцов стали 15X2НМФА с номинальной толщиной 2 мм при использовании медных ударников различной толщины.

растает. Последующие колебания скорости поверхности вызваны многократными отражениями волн между поверхностью откольного разрушения и свободной тыльной поверхностью плоского образца. Средняя скорость поверхности в процессе колебаний на рисунке 1 остается практически неизменной, что говорит о том, что к концу первой реверберации откольное разрушение практически завершилось, откольная пластина в ее центральной части полностью отделилась от остальной части образца. Декремент скорости  $\Delta u_{fs}$  перед фронтом откольного импульса пропорционален величине растягивающего напряжения непосредственно перед откольным разрушением — откольной прочностью  $\sigma_{sp}$ . Четко видимое на рисунке 1 различие в величинах  $\Delta u_{fs}$  для образцов одинаковой толщины в опытах с ударниками разной толщины связано, в основном, как будет показано ниже, с искажением волнового профиля вследствие различия в скоростях распространения фронта откольного импульса и падающей волны разрежения перед ним. На профиле скорости свободной поверхности в опыте с ударником толщиной 2 мм четко просматривается выделение упругого предвестника в откольном импульсе. Откольный импульс представляет собой волну сжатия, распространяющуюся в растянутом упругопластическом материале. Начальная стадия сжатия в этом случае должна быть упругой и, следовательно, формирование упругого предвестника откольного импульса вполне соответствует ожиданиям.

На рисунке 2 представлены результаты серии из трех опытов с образцами стали толщиной 2 мм. Волновые профили качественно подобны показанным на рисунке 1. При минимальной толщине ударника и, соответственно, откольной пластины регистрируется небольшое общее торможение последней в процессе ре-



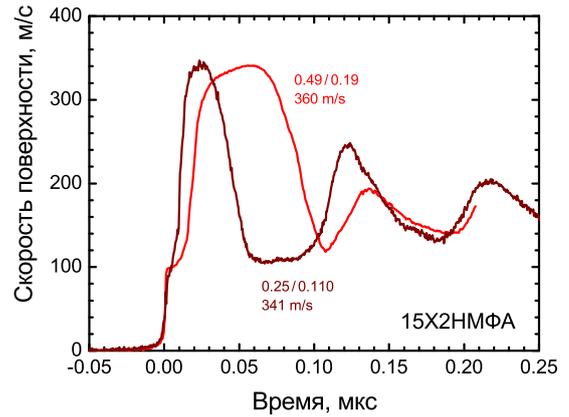
**Рисунок 3.** Профили скорости свободной поверхности образцов стали 15X2NMFA толщиной 0.77–1 мм, полученные при использовании медных ударников различной толщины.

верберации волн. Дело в том, что величина растягивающего напряжения определяет только условия инициирования разрушения. Для полного завершения разрушения необходимо совершить некоторую работу, на что расходуется часть кинетической энергии откалывающейся пластины. При прочих равных условиях запас кинетической энергии откалывающейся пластины очевидно пропорционален ее толщине. Кроме того, близость зоны разрушения к свободной поверхности образца в опыте с тонким ударником ограничивает длительность действия больших растягивающих напряжений, что также приводит к затягиванию процесса откольного разрушения.

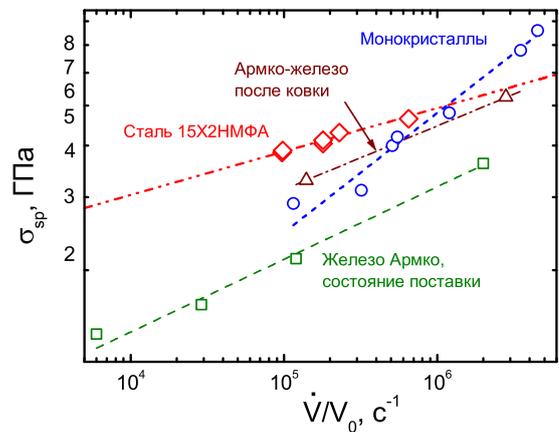
На рисунке 3 приведены результаты опытов с образцами стали толщиной 0.7–1 мм. Волновые профили подобны обсуждавшимся выше. При малой толщине ударника четко выражено затянутое торможение откалывающегося слоя образца. На рисунке 4 представлены результаты опытов с образцами толщиной 0.5 мм и 0.25 мм. В образце толщиной 0.25 мм откольное разрушение не фиксируется. Разгрузка в данном случае, по-видимому, ограничивается не началом разрушения, а условием на поверхности контакта медного ударника с подложкой из полиметилметакрилата. Плато скорости в конце разгрузки примерно на 40 м/с превышает параметры, оцененные из соотношения ударных адиабат для удара плексигласовой подложки по стальной преграде, однако эта оценка не учитывала упругопластические свойства стали. Вклад упругопластического поведения материала должен приводить к появлению гистерезиса скорости после цикла ударного сжатия и последующей разгрузки. Декремент скорости  $\Delta u_{fs}$  в опыте с полумиллиметровым образцом больше, чем в предыдущих опытах; в эксперименте с образцом толщиной 0.25 мм он был бы еще больше, если бы разгрузка не была ограничена параметрами удара подложки.

### 5. ОТКОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ 15X2NMFA

Величина откольной прочности определялась по декременту скорости поверхности  $\Delta u_{fs}$  при ее спаде от



**Рисунок 4.** Профили скорости свободной поверхности образцов стали 15X2NMFA толщиной 0.25–0.5 мм, полученные при использовании медных ударников различной толщины.



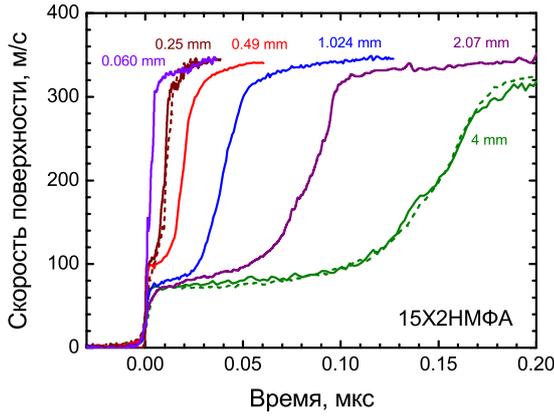
**Рисунок 5.** Результаты измерений откольной прочности стали 15X2NMFA в сопоставлении с полученными ранее данными для железа Армко и монокристаллов железа.

максимума до значения перед фронтом откольного импульса. В линейном (акустическом) приближении:

$$\sigma_{sp} = \frac{1}{2} \rho_0 c_b (\Delta u_{fs} + \delta) \quad (1)$$

где  $\delta$  – поправка на искажение профиля скорости вследствие различия скорости фронта откольного импульса, и скорости пластической части падающей волны разгрузки перед ним, движущейся с объемной скоростью звука ( $c_b$ ) [4, 5]. Найденные таким способом значения откольной прочности  $\sigma_{sp}$  стали 15X2NMFA представлены на рисунке 5 в виде зависимости от скорости деформирования в падающей волне разрежения. Под скоростью деформирования здесь понимается скорость расширения вещества в волне разрежения, определяемая как:

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = -\frac{\dot{u}_{fsr}}{2c_b} \quad (2)$$



**Рисунок 6.** Фронтальные части профилей скорости свободной поверхности образцов стали 15X2НМФА различной толщины. Значения толщины указаны у профилей. Штриховыми линиями показаны результаты дублирующих опытов.

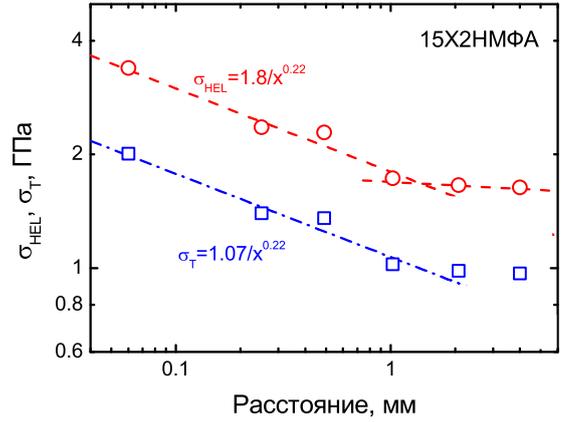
где  $\dot{u}_{fsr}$  — измеренная скорость спада скорости свободной поверхности испытуемого образца в разгрузочной части импульса ударного сжатия. Показано [3], что начальная скорость роста относительного объема несплошностей при отколе с точностью до постоянного множителя  $\sim(2-4)$  равна вычисленной таким образом скорости расширения вещества в волне разгрузки. Следовательно, зависимость величины разрушающего напряжения при отколе от определенной таким образом скорости деформации может быть преобразована в зависимость начальной скорости разрушения от напряжения. Результаты измерений, показанные на рисунке 5, аппроксимируются степенной зависимостью:

$$\sigma_{sp} = 3.87[(\dot{V}/V_0)/\dot{\epsilon}_c]^{0.105} \text{ ГПа}, \quad \dot{\epsilon}_c = 10^5 \text{ с}^{-1}. \quad (3)$$

На рисунке 5 результаты измерений сопоставляются с полученными ранее данными для Армко-железа в исходном (размер зерна  $\sim 28$  мкм) и ультрамелкозернистом состояниях [6], а также для отдельных крупных (5–10 мм) зерен, фактически — монокристаллов, высококочистого железа [7]. Ультрамелкозернистое состояние Армко-железа получалось в результате интенсивной пластической деформации методом всестороннейковки с суммарной деформацией более 1500%. Видно, что при скоростях деформации меньше  $10^6 \text{ с}^{-1}$  сталь имеет наибольшую откольную прочность.

## 6. ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ СТАЛИ 15X2НМФА

На рисунке 6 сопоставлены фронтальные части профилей скорости свободной поверхности образцов стали различной толщины. На расстояниях до 1 мм регистрируется затухание упругого предвестника, затем, в диапазоне 1–4 мм, амплитуда предвестника сохраняется практически неизменной. Регистрируемая ширина пластической ударной волны увеличивается по мере распространения; отчасти это связано с переотражениями предвестника между свободной поверхностью и пластической ударной волной [4].



**Рисунок 7.** Зависимость регистрируемых значений динамического предела упругости  $\sigma_{HEL}$  и соответствующих значений динамического предела текучести  $\sigma_T$  стали 15X2НМФА от пройденного ударной волной расстояния.

По измеренной величине скачка скорости свободной поверхности во фронте упругого предвестника  $u_{HEL}$  определяются значения динамического предела упругости  $\sigma_{HEL}$  и динамического предела текучести  $\sigma_T$ , соответствующие данному расстоянию распространения волны:

$$\sigma_{HEL} = \rho_0 c_l u_{HEL} / 2, \quad \sigma_T = \frac{3}{2} \sigma_x (1 - c_b^2 / c_l^2) \quad (4)$$

Затухание упругого предвестника волны ударного сжатия вследствие релаксации напряжений связано со скоростью пластической деформации за его фронтом  $\dot{\gamma}_p = (\dot{\epsilon}_x^p - \dot{\epsilon}_y^p) / 2$  соотношением [8]:

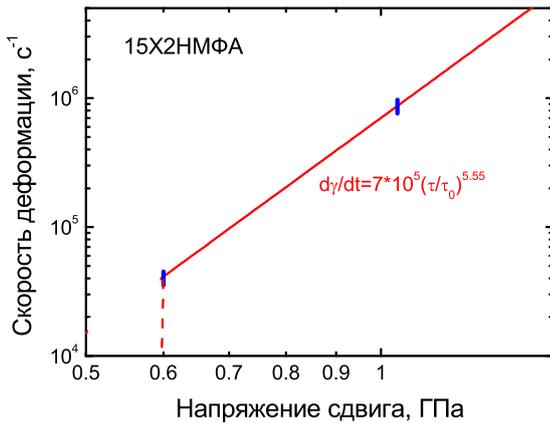
$$\left. \frac{d\sigma_x}{dh} \right|_{HEL} = -\frac{4}{3} \frac{G \dot{\gamma}_p}{c_l} \quad (5)$$

где  $h$  — пройденное волной расстояние,  $G$  — модуль сдвига,  $c_l$  — скорость распространения фронта предвестника, принятая в этом приближении равной продольной скорости звука.

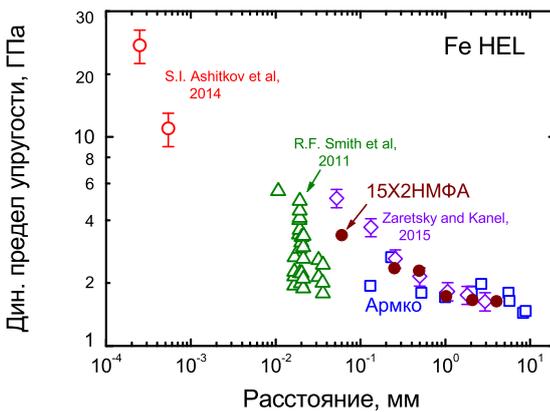
Полученные таким образом зависимости регистрируемых значений динамического предела упругости и динамического предела текучести от пройденного ударной волной расстояния представлены на рисунке 7. Как и для других металлических материалов, начальный участок эмпирической зависимости аппроксимируется степенной функцией:

$$\sigma_{HEL} = S(h/h_0)^{-\alpha} \quad (6)$$

где эмпирические константы  $S$  и  $\alpha$  равны 1.8 и 0.22 ГПа соответственно, параметр  $h_0 = 1$  мм. Относительно малая величина показателя  $\alpha$  характерна для металлов с объемно-центрированной кубической структурой. Эмпирическая зависимость (6) трансформируется в зависимость начальной скорости пластической деформации



**Рисунок 8.** Зависимость скорости деформации от напряжения на начальном участке распространения ударной волны в стали 15X2HMΦA. Вертикальные синие отрезки показывают границы диапазона экспериментальных данных. Штриховой линией показана оценка зависимости при умеренных и низких скоростях деформации.



**Рисунок 9.** Сопоставление значений динамического предела упругости стали 15X2HMΦA и железа.

от напряжения сдвига  $\tau$ :

$$\dot{\gamma}_p = \frac{3}{4} \left( \frac{\tau E'}{SG} \right)^{\frac{\alpha+1}{\alpha}} \frac{S \alpha c_l}{h_0 G} \quad (7)$$

где  $E' = \rho_0 c_l^2$  — модуль продольной упругости,  $G$  — модуль сдвига. Рассчитанная с использованием соотношения (7) зависимость начальной скорости сдвиговой деформации от напряжения сдвига представлена на рисунке 8. На участке быстрого затухания эта зависимость имеет вид:

$$\dot{\gamma} = 7 \cdot 10^5 (\tau/\tau_0)^{5.55} \text{ с}^{-1} \quad (8)$$

где  $\tau_0 = 1$  ГПа. На расстояниях больше 1 мм зависимость резко ослабевает, но затухание должно продолжаться,

поскольку напряжение в упругом предвестнике остается высоким, значительно выше предела текучести в нормальных условиях. Зависимость скорости деформации от напряжения на этом участке на графике ориентировочно иллюстрируется штриховой линией.

На рисунке 9 результаты измерений динамического предела упругости стали 15X2HMΦA сопоставляются с полученными ранее [9–12] аналогичными данными для железа. В основном эти данные в пределах разброса совпадают.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия ударно-волновых экспериментов с образцами стали 15X2HMΦA толщиной от 60 мкм до 4 мм, в которых измерены профили скорости свободной поверхности образцов при выходе на нее импульса ударного сжатия. По результатам измерений определены зависимости сопротивления деформированию и разрушению стали от скорости деформации, которые в дальнейшем могут быть использованы при построении математических моделей и определяющих соотношений для расчетов высокоскоростной деформации и разрушения. Полученные данные сопоставлены с подобными параметрами для железа в различных структурных состояниях. Найдено, что сталь 15X2HMΦA характеризуется вдвое более высокой динамической прочностью на растяжение, чем железо, при практически равных значениях динамического предела упругости. Поскольку сопротивление росту несплошностей пропорционально пределу текучести материала, различие динамической прочности стали и железа определяется, по-видимому, количеством потенциальных очагов разрушения в этих материалах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barker L M and Hollenbach R E 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 4669–4675
2. Зельдович Я Б и Райзер Ю П 1966 *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (Москва: Наука)
3. Канель Г И, Разоренов С В, Уткин А В и Фортов В Е 1996 *Ударно-волновые явления в конденсированных средах* (Москва: Янус-К)
4. Канель Г И 2018 *Ударные волны в физике твердого тела* (Москва: Физматлит)
5. Канель Г И 2001 *ПМТФ* **42** 194–198
6. Канель Г И, Разоренов С В и Фортов В Е 2005 *МТТ* **4** 86–111
7. Разоренов С В, Канель Г И и Фортов В Е 2004 *Письма в ЖЭТФ* **80** 395–397
8. Duvall G E 1964 Propagation of plane shock waves in a stress-relaxing medium *Stress Waves in Anelastic Solids* ed Kolsky H and Prager W (Berlin: Springer-Verlag)
9. Канель Г И, Разоренов С В, Гаркушин Г В, Ашитков С И, Комаров П С и Агранат М Б 2014 *ФТТ* **56** 1518–1522
10. Zaretsky E B and Kanel G I 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 195901
11. Ashitkov S I, Komarov P S, Agranat M B, Kanel G I and Fortov V E 2014 *J. Phys.: Conf. Ser.* **500** 112006
12. Smith R F, Eggert J H, Rudd R E, Swift D C, Bolme C A and Collins G W 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 123515