

05;12

## Статистические характеристики множественного разрушения металлических мишеней при динамическом нагружении и их связь с механическими параметрами материалов

© Б.К. Барахтин,<sup>1</sup> Ю.И. Мещеряков,<sup>2</sup> Г.Г. Савенков<sup>3</sup><sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», 191015 Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН, 199178 Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт «Поиск», 188162 Мурино, Ленинградская область, Россия

(Поступило в Редакцию 30 декабря 2008 г. В окончательной редакции 27 апреля 2009 г.)

Представлены результаты статистической обработки повреждений в плоских мишенях из трех марок стали после их ударного нагружения со скоростью 100–650 м/с. Определены законы распределения дефектов по размерам. Показано, что в общем случае в исследованном диапазоне значений скорости процесс накопления повреждений не является автомодельным. Приведены результаты определения динамической вязкости разрушения исследованной стали, и показано, что эта характеристика связана с изменением механических свойств и размаха скоростей частиц среды на масштабно-структурном уровне мезо II.

### Введение

Динамическое высокоинтенсивное нагружение металлов сопровождается образованием большого количества разномасштабных дефектов в волнах нагрузки и разгрузки, приводящих к образованию магистральной трещины или к полному разрушению (например, откольному) образца техники. Известно, что процессы накопления дефектов (повреждений) как при квазистатическом, так и при высокоскоростном нагружении являются стадийными и полимасштабными. При достижении критической плотности и размеров дефектов одного структурного уровня происходит их реорганизация с образованием ансамблей дефектов следующего уровня. Конечной стадией эволюционного процесса является образование магистральной трещины, т.е. при численном моделировании процессов динамического разрушения учет кинетики процессов структурной перестройки является важным фактором точности и достоверности получаемых результатов. Между тем информация, которая необходима для отыскания адекватно точного решения, всегда заведомо неполная вследствие отсутствия достаточно достоверных данных о характеристиках, входящих в кинетические модели, и динамических свойствах материалов при соответствующих температурно-скоростных режимах нагружения. Поэтому экспериментальное изучение кинетики процесса динамического разрушения с целью получения как можно более полной информации о его параметрах и функциях является важной прикладной задачей динамической механики разрушения.

Для условий статического и квазистатического нагружения установлено [1], что процессы накопления повреждений являются автомодельными, т.е. распределение дефектов по размерам в различные моменты времени получается одно из другого преобразованием подобия.

Данное обстоятельство значительно упрощает моделирование процессов разрушения в условиях медленного нагружения.

При динамическом нагружении автомодельность накопления повреждений требует экспериментальной проверки. Пока свойство самоподобия множественного разрушения в условиях импульсного нагружения нашло свое подтверждение только при воздействии на материал потока частиц или электромагнитного излучения (например, лазерного) с длительностью  $\sim 10^{-12} - 10^{-8}$  с [2].

Если автомодельность накопления повреждений в условиях высокоскоростного нагружения (в частности, откольного) имеет место, то возникает необходимость получения данных об изменении линейного масштаба распределения по размерам (например, среднего  $\langle l \rangle$  или максимального  $l_m$  размера) в зависимости от свойств материала и параметров нагружения, а также их влияния на динамические характеристики самого материала что требуется для разработки модели кинетики процесса разрушения. При отсутствии автомодельного характера накопления повреждаемости необходимо знать уже по крайней мере две статистические характеристики (среднее значение размера дефекта и его дисперсии), чтобы в рамках неполной информации о динамическом процессе разрушения сделать заключение о наиболее правдоподобном законе распределения дефектов (например, на основе принципа максимума информационной энтропии [3]).

Кроме того, отдельной проблемой является экспериментальное определение динамических механических характеристик (в частности, динамической вязкости разрушения) материалов, необходимых для расчетов конструкционных элементов на хрупкую прочность в условиях высокоскоростного нагружения. Получаемые значения динамической трещиностойкости  $K_{Id}$  на умень-

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов образцов

Марка стали	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	KCU, MJ/m <sup>2</sup>	$K_{1C}$ , МПа/м <sup>0.5</sup>	$d_3$ , $\mu\text{m}$
40X	415	680	8	0.2	6	40
45	330	610	14	0.3	17	59
12X18H10T	345	560	56	3.2	25	35

Примечание. Механические свойства марок стали 40X и 45 отличаются от соответствующих характеристик, приведенных в нормативных документах.

шенных образцах соответствуют скоростным параметрам нагружения ниже требуемых для практического использования [4] и имеют существенно больший разброс по сравнению с разбросом механических характеристик, определяющих сопротивление деформированию. Такой разброс связывают с тем, что сопротивление хрупкому разрушению чувствительно к неоднородности локальных свойств материала, включений и т.д. Поэтому задача получения данных по динамической вязкости разрушения, устраняющих перечисленные недостатки, приобретает большое практическое значение.

Целью проведенной работы являлось выяснение характера процесса множественного разрушения в условиях откола при субмикросекундной длительности импульса нагрузки, установление взаимосвязи между параметрами образующихся дефектов ( $\langle l \rangle$  и  $l_m$ ) и параметрами нагружения (скорость удара), а также получение данных по динамической вязкости разрушения (динамической трещиностойкости  $K_{Id}$ ) испытываемых материалов на основе металлографического анализа экспериментальных результатов.

## Материалы и методики экспериментальных исследований

Механические характеристики испытанных образцов стали и средний размер зерна в них приведены в табл. 1.

Нагружение мишеней в виде дисков толщиной 5–7 мм и диаметром 52 мм осуществлялось плоскими ударниками, выстреливаемыми из пневматической пушки калибром 37 мм со скоростью  $V_0 = 100\text{--}650$  м/с.

В процессе испытаний с помощью лазерного дифференциального интерферометра по методике [5] определялись: распределение частиц материалов мишеней по скоростям на структурных масштабных уровнях мезо I ( $\Delta u$ ) и мезо II ( $\delta u$ ) и откольная прочность образцов ( $\sigma_p$ ). Откольная прочность определялась в квазиакустическом приближении (без учета упругопластических свойств материала образца) по известному соотношению

$$\sigma_p = 0.5\rho_0 C_0 (W_0 - W_m),$$

где  $\rho_0$  — начальная плотность материала;  $C_0$  — объемная скорость звука в материале образца;  $W_0$  — максимальная скорость свободной поверхности;  $W_m$  — скорость свободной поверхности в первом минимуме зависимости  $W(t)$ ;  $t$  — время.

Испытанные образцы разрезались и после приготовления шлифов подвергались металлографическим исследованиям на световом микроскопе ММУ-9 и электронном растворе — SEM535. Методами количественной металлографии производилось выявление и измерение микро- и мезодефектов, параллельных свободной поверхности, и строились функции распределения в  $n/\langle n \rangle = f(l_i/\langle l \rangle)$ , где средний размер дефекта

$$\langle l \rangle = [\sum nl]/n,$$

а  $\langle n \rangle = [\sum n_i]/n$  — среднее число измерений 1-го типа размера дефекта.

Законы распределения определялись с помощью статистических моментов второго, третьего и четвертого порядка величины размера дефекта, по которым рассчитывались выборочные нормированные показатели кривых Пирсона: асимметрии ( $\beta_1$ ) и островершинности ( $\beta_2$ ) [6]:

$$\begin{aligned} \beta_1^{0.5} &= (\mu_3/\mu_2)^{3/2}, \\ \beta_2 &= \mu_4/(\mu_2)^2, \end{aligned}$$

где  $\mu_2 = [\sum(x_i - x)^2]/(n - 1)$  — второй статистический центральный момент (дисперсия);  $\mu_3 = [\sum(x_i - x)^3]/n$  — третий статистический центральный момент;  $\mu_4 = [\sum(x_i - x)^4]/n$  — четвертый статистический центральный момент (здесь  $x_i = l_i$ ,  $x = \langle l \rangle$ ) и по номограммам, приведенным в [6], находили закон распределения.

## Результаты исследований и их обсуждение

Все полученные результаты испытаний совместно с параметрами нагружения сведены в табл. 2 и представлены на рис. 1–4. На рис. 1–3 приведены статистические результаты, на рис. 4 — изображена типичная структура (для стали 45) в металле образцов после динамического нагружения.

При выбранных значениях увеличения (от  $\times 60$  до  $\times 1000$ ) на шлифах надежно фиксировались дефекты в виде микро- и мезотрещин протяженностью от  $1\ \mu\text{m}$ , единичные наблюдения микроповреждений меньшего размера классифицировались как микропоры диаметром  $0.5\ \mu\text{m}$ . Металлографические исследования шлифов показали, что для образцов из стали марок 40X и 45 характерны повреждения в виде микро- и мезотрещин, а для более вязкой по сравнению с ними

Таблица 2. Динамические характеристики и параметры дефектов испытанных марок стали

Марка стали	$V_0$ , m/s	$\Delta u$ , m/s	$\delta u$ , m/s	$\sigma_p$ , GPa	$\langle l \rangle$ , $\mu\text{m}$	$l_p$ , $\mu\text{m}$	Закон распределения
40X	231	0	75.6	1.1	22.0	87	Гамма
	310	0	83.8	1.35	24.65	140	Вейбулла
	455	0	87.2	1.54	28.2	186	»
	620	0	90	1.782	35.3	188	»
45	146	0	38	—	20.8	67	Логарифмически нормальный
	246	0	63.5	1.8	24.25	89	Гамма
	286	0	62	2.05	25.5	95	Вейбулла
	358	0	65.5	2.45	27.9	100	»
12X18H10T	108	0	33	—	16.0	69.5	Логарифмически нормальный
	181	13	48	1.64	18.6	103	»
	216	24	81	1.1	19.8	118	Гамма
	345	30	43	1.69	24.4	124	Вейбулла
	447	64	171	1.43	27.8	128	»

стали 12X18H10T кроме трещин наблюдалось большое количество микропор.

Результаты обработки экспериментов показали, что для всех марок стали аналитические зависимости рас-

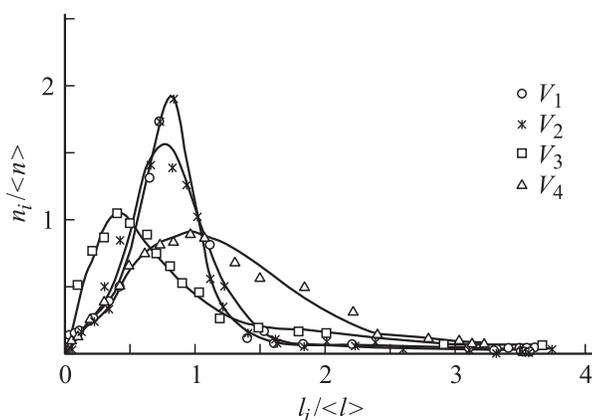


Рис. 1. Безразмерные статистические распределения мезодефектов для стали 45. Скорость:  $\circ$  — 358,  $*$  — 286,  $\square$  — 246,  $\triangle$  — 146 m/s.

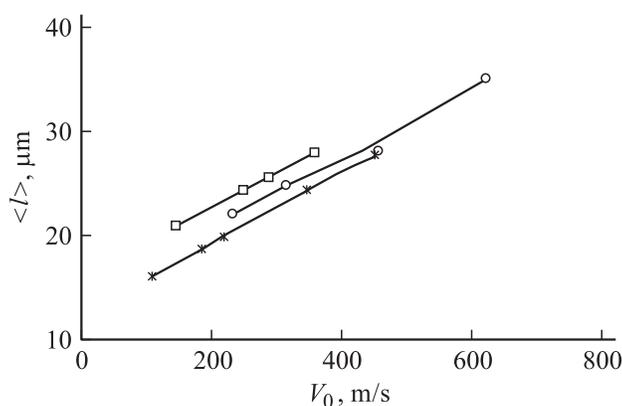


Рис. 2. Зависимости среднего размера дефекта от скорости удара (здесь и далее для рис. 3 и 5:  $*$  — сталь 12X18H10T,  $\square$  — сталь 45,  $\circ$  — сталь 40X).

пределения дефектов по размерам при всех имевших место скоростях удара характеризуются графиками с „тяжелыми хвостами“, которые могут быть представлены различными законами распределения, содержащими экспоненциальный множитель: логарифмически нормальным, Вейбулла и гамма. Во всех случаях с увеличением скорости удара увеличивается крутизна спада закона распределения.

Нельзя утверждать, что для испытанных материалов имеет место автомодельность накопления повреждений; так, например, у стали 45 законы распределения для разных скоростей удара различны — логарифмически нормальный для  $V_0 = 146$  m/s, Вейбулла для  $V_0 = 358$  m/s и 286 m/s и гамма для  $V_0 = 246$  m/s (и такие же примеры существуют и для стали марок 40X и 12X18H10T (см. табл. 2).

Зависимости среднего размера дефекта от скорости удара для всех трех марок стали являются линейными функциями вида  $\langle l \rangle = aV_0 + b$ , причем эти прямые практически параллельны друг другу, коэффициент  $a$ , определяющий угол наклона к оси абсцисс,

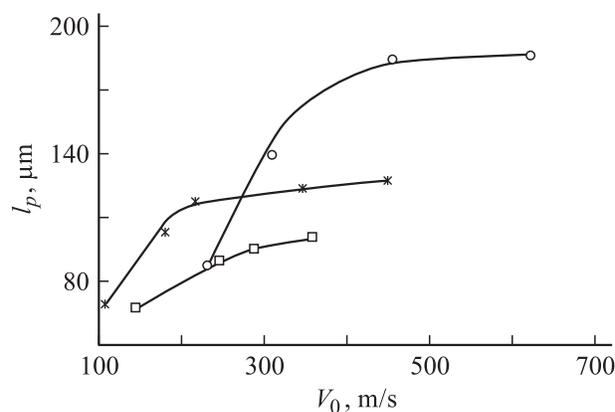


Рис. 3. Зависимости размаха размера дефекта от скорости удара.

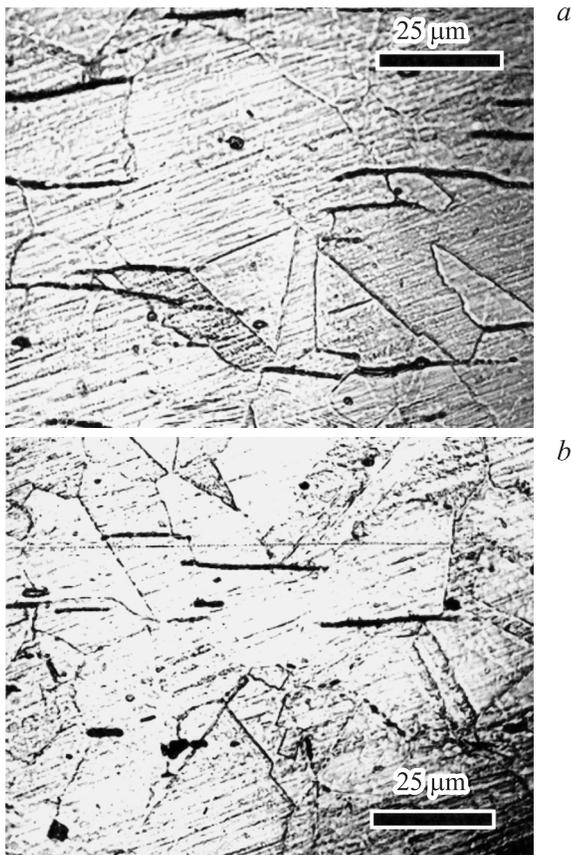


Рис. 4. Микроструктура стали 45: *a* — близко к центру мишени, *b* — на периферии мишени.

равен  $0.0342, 0.0336, 0.0348 \mu\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$  для стали 40X, 45 и 12X18Н10Т соответственно.

Зависимости размаха размеры дефектов  $l_p$  от скорости удара являются не такими вполне определенными, как  $\langle l \rangle$ , что, очевидно, является следствием вероятностного характера движения трещины, поскольку в общем случае она распространяется дискретно со случайными приращениями в случайные моменты времени. Однако можно отметить, что эти зависимости имеют тенденции к насыщению, поскольку максимальный размер мезотрещины, очевидно, не может превышать размера  $l_{mx} \leq C_R T$  ( $T$  — длительность импульса растяжения,  $C_R$  — скорость волны Рэлея).

Наибольший средний размер дефекта у образцов из стали 45, наименьший — из стали 12X18Н10Т, что полностью соответствует соотношению между средними размерами зерен в этих сталях.

Остановимся на выводе о линейности функции среднего размера дефекта от скорости удара. Полученные линейные зависимости  $\langle l \rangle = aV_0 + b$  имеют вид асимметричной зависимости  $D = f(V_0)$  [7]:

$$D = -kV_0 + h,$$

где  $D$  — фрактальная размерность контура откольной щели.

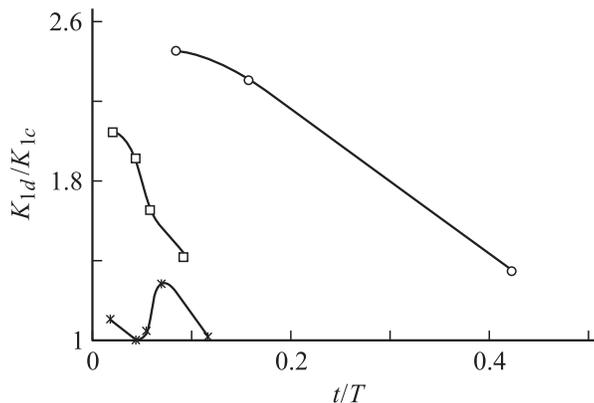
Контур откольной щели (или магистральная трещина, возникающая в волне растяжения) является фрактальным конечным кластером, состоящим из большого количества микро- и мезотрещин [8]. Фрактальная размерность кластера является его количественной характеристикой, которая показывает степень заполнения кластером объемлющего пространства. В нашем случае это означает степень увеличения длины контура откола по сравнению с ее проекцией. Очевидно, что чем большие компоненты составляют кластер, тем меньше степень его заполненности, что и подтверждают полученные асимметричные виды зависимостей  $\langle l \rangle = f(V_0)$  и  $D = f(V_0)$ .

Большой интерес представляет определение с помощью статистических характеристик мезодефектов в мишенях динамической вязкости разрушения ( $K_{Id}$ ) их материалов, которая считается параметром материала и используется для расчетов конструкций [4]. Следует отметить, что определение этой характеристики при таких значениях времени разрушения, как в описываемых экспериментах, и на применяемых в механике разрушения образцах весьма затруднительно [4,9]. В процессе откола рост мезодефектов происходит в условиях практического отсутствия взаимного влияния. На это указывает то, что мезотрещины фактически параллельны между собой (рис. 4) и параллельны свободной поверхности, хотя, казалось бы, взаимное влияние полей напряжений в вершинах трещин должно приводить к изменению в них направления действия главных напряжений и соответственно к развороту траекторий дефектов навстречу друг другу, чего не происходит. Вероятно, этот факт связан с двумя обстоятельствами: во-первых, с конечностью скорости обмена информации (равной скорости звука) между мезодефектами при скоротечности самого процесса разрушения и, во-вторых, направленностью структуры материала мишеней. Именно отсутствие взаимовлияния мезодефектов позволяет определить динамическую вязкость разрушения исследуемых материалов по зависимости [10] для коэффициента интенсивности напряжений при мгновенном импульсе растяжения ( $T \rightarrow 0$ )

$$K_{Id} = 2P_0 c_2 (c_1 - c_2)^{0.5} / [c_1 (\pi c_{1t})^{0.5}], \quad (1)$$

где  $P_0 = \sigma_0 T$ ;  $\sigma_0 = 0.5\rho_0 C_0 V$ ;  $c_{1,2}$  — скорость продольных и поперечных звуковых волн соответственно;  $t = l_m / C_R$ ;  $l_m$  — максимальный размер мезодефекта.

Значение  $t$  взято для максимальной длины трещины из соображений того, что поведение малых трещин существенно отличается от поведения больших дефектов вследствие сил сцепления, которые действуют для малых трещин не только вблизи их вершин, но и на их значительном протяжении. Поэтому чтобы уменьшить вносимые этими силами искажения в напряженное состояние трещины, и выбрана максимальная длина трещины, кроме того, трещина максимальной длины пересекает несколько зерен металла, что усредняет его



**Рис. 5.** Зависимости безразмерной вязкости разрушения от безразмерного времени.

свойства и делает определяемую характеристику более представительной.

Рассчитанные по зависимости (1) значения  $K_{Id}$  в виде графиков в безразмерных координатах приведены на рис. 5. Обращает на себя внимание немонотонный характер зависимости динамической вязкости разрушения для стали 12Х18Н10Т, ранее такая возможность поведения  $K_{Id}$  в зависимости от соотношения  $T/\tau$  ( $\tau$  — структурное время разрушения) для длинных трещин ( $l \geq 2.5$  mm) обсуждалась в [11].

Рассмотрим влияние скорости нагружения на динамическую вязкость разрушения для нашего случая. Будем связывать такое влияние на поведение этой характеристики исключительно с зависимостью механических свойств материала от скорости деформации. Для этого представим процесс развития трещины как результат достижения критических деформаций ( $\epsilon_*$ ) в области, примыкающей к поверхности разрушения (трещины), и воспользуемся понятием  $J$ -интеграла для контура трещины.

Критическое значение  $J$ -интеграла связано с характеристиками материала следующей зависимостью (для плоской динамической деформации) [12]:

$$J_{Id} = (1 - \nu^2)K_{Id}^2/E = 1.6\sigma_{md}\delta_{Id}, \quad (2)$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\sigma_{md}$  — динамический предел текучести;  $\delta_{Id}$  — критическое значение раскрытия трещины;  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Критическое значение раскрытия трещины может быть выражено в виде [13]:

$$\delta_{Id} = 8\epsilon_*l_0\sigma_{md}(1 - \nu^2)/\pi E, \quad (3)$$

где  $\epsilon_* = (l_1 - l_0)/l_0$ ;  $l_0$  — длина трещины с пластической зоной. Подставив (3) в (2), получим значение динамической вязкости разрушения

$$K_{Id} \approx 2\sigma_{md}(e)^{0.5}, \quad (4)$$

где  $e$  — ширина зоны пластической деформации ( $e = l_1 - l_0$ ). Динамический предел текучести в диапа-

зоне высоких значений скорости деформации определяется своей вязкой составляющей

$$\sigma_{md} = \sigma_0 + 4\mu_\tau\dot{\epsilon}_*,$$

где  $\sigma_0$  — статическое значение предела текучести;  $\mu_\tau$  — коэффициент динамической вязкости;  $\dot{\epsilon}_* = \epsilon_*/t$  — средняя скорость неупругого деформирования. Для мезомасштабного уровня деформирования коэффициент динамической вязкости может быть определен из гидродинамических аналогий по зависимости [14]:

$$\mu_\tau = \rho_0\delta u h,$$

где  $h$  — характерный размер мезопотока частиц материала мишени.

Подставив в (4) значения динамического предела текучести и коэффициента динамической вязкости, получим окончательное выражение для динамической вязкости разрушения:

$$K_{Id} \approx 2\sigma_0e^{0.5} + 8\rho_0\delta u e^{0.5}h(\epsilon_*/t) \quad (5)$$

или

$$K_{Id} \approx K_{IC} + \delta u A/t \quad (6)$$

(здесь  $A = 8\rho_0e^{0.5}h\epsilon_*$ ).

Таким образом, в соответствии с (5) и (6) вид зависимости  $K_{Id}$  как функции времени будет определяться изменением  $\delta u$  во времени. Для стали 12Х18Н10Т зависимость  $\delta u$  от времени имеет существенно немонотонный вид [7], что и определяет немонотонность  $K_{Id}$  для нашего случая.

Немонотонное изменение откольной прочности в этой стали (табл. 3) рассматривалось в [15], где эта немонотонность также связывалась с немонотонным характером изменения  $\delta u$  от времени.

**Таблица 3.** Динамическая вязкость разрушения испытанных марок стали

Марка стали	$V_0$ , m/s	$T$ , ns	$t$ , ns	$K_{Id}$ , МПа · м <sup>0.5</sup>
40X	231	340	29.4	14.7
	310	300	47.3	13.8
	455	230	62.8	11.1
	620	150	63.5	8.1
45	146	1100	22.6	34.8
	242	700	30.1	32.4
	286	540	32.1	28.1
	358	395	36.8	24.0
	12X18H10T	108	1200	23.5
	181	800	34.8	25.2
	216	740	39.9	26.0
	345	585	41.9	32.1
	447	370	43.2	25.5

Примечание. Скорость волны Рэлея принята  $C_R = 2.96$  km/s.

## Заключение

1. Процесс накопления повреждений при динамическом откольном разрушении в вобщем случае не является автомодельным процессом, что может быть связано с синхронным инициированием большого количества очагов зарождения дефектов.

2. Соотношение Розина–Рамлера может приняться в качестве универсальной зависимости при определении суммарного количества дефектов, поскольку все полученные экспериментальные распределения содержат экспоненту в том или ином виде.

3. Характер зависимости динамической вязкости от скорости деформации определяется зависимостью от скорости деформации размаха скоростей (ширины распределения по скоростям) на мезоскопическом масштабном уровне.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 08-02-00329-а).

## Список литературы

- [1] Ботвина Л.Р., Баренблатт Г.И. // Проблемы прочности. 1985. № 12. С. 17–24.
- [2] Илькаев Р.И., Уцаев А.Я., Новиков С.А., Завада Н.И. и др. // Докл. АН. 2002. Т. 384. № 3. С. 328–333.
- [3] Джейнс Э.Т. // Тр. американских инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1982. № 9. С. 33–51.
- [4] Степанов Г.В., Маковой В.А. Динамическая трещиностойкость сталей при квазистатическом нагружении. Киев: Ин-т проблем прочности, 1988. 46 с.
- [5] Мещеряков Ю.И., Диваков А.К. Интерференционный метод регистрации скоростной неоднородности частиц в упруго-пластических волнах нагрузки в твердых телах. Л.: Ленинградский фил. ин-та машиноведения, 1989. 36 с.
- [6] Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М.: Атомиздат, 1978. 237 с.
- [7] Барахтин Б.К., Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. // Науч. тр. V Междунар. семинара по проблемам прочности им. В.А. Лихачева. Великий Новгород, 2001. С. 43–47.
- [8] Савенков Г.Г. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 12. С. 44–48.
- [9] Механика разрушения. Быстрое разрушение, остановка трещин: Сб. статей / Пер. с англ. под ред. Р.В. Гольдштейна. М.: Мир, 1981. 254 с.
- [10] Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
- [11] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Тарабан В.В. // Докл. АН. 2000. Т. 371. № 2. С. 186–188.
- [12] Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев: Наук. думка, 1968. 246 с.
- [13] Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
- [14] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1987. 646 с.
- [15] Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. // Мат. докл. XVIII Петербургских чтений по проблемам прочности и роста кристаллов. СПб., 2008. Ч. II. С. 50–52.