

5. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Докл. АН СССР, 1979, 249, 3, 580.
6. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, 4, 12.
7. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Колесников А. К. Изв. АН СССР. МЖГ, 1985, 5, 3.

г. Пермь

Поступила в редакцию 22/XI 1989

УДК 539.04, 539.374

Г. Г. Савенков, Ю. И. Мещеряков, В. Б. Васильков, А. И. Чернышенко

КОЛЕБАНИЯ ЗЕРЕН И РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ХАРАКТЕРА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ¹

Согласно современным представлениям физики прочности и пластичности, процессы деформации и разрушения происходят на различных структурных уровнях, а определяющую роль при больших пластических деформациях играют ротационные моды [1—3]. В [2] отмечено, что пластическая деформация с участием поворотных мод напоминает вихревое движение турбулизированной жидкости при больших числах Рейнольдса. Турбулентность характера пластической деформации при высокоскоростном взаимодействии твердых тел подтверждалась авторами настоящей работы неоднократно [3, 4].

Единого подхода к природе возникновения турбулентного течения в поликристаллах в настоящее время не существует. Авторы [1] считают, что турбулизация пластического течения возникает всегда при наличии поворотной моды деформации независимо от других условий течения, в [5] отмечена необходимость критических условий, а в [6] эти условия сформулированы в следующем виде: для возникновения турбулентного течения необходимо, чтобы тензор скорости пластической деформации был несимметричен и достаточно велико было снижение величины диссипируемой энергии.

В то же время в теории гидродинамической и плазменной турбулентности усиленно разрабатывается направление, согласно которому развитие вихревого течения связано с хаотическими и стохастическими колебаниями частиц жидкости и плазмы [7].

При взаимодействии твердых тел (в частности, при внедрении пластических ударников, например кумулятивных струй, в первоначально жесткие преграды) со скоростями соударения $v_0 \geq 2$ км/с материалы преграды и ударника переходят в жидкое или пластическое состояние независимо от своего первоначального вида. Существуют ли в этом случае колеблющиеся элементы в материалах, приводят ли они к зарождению турбулентного течения и как идентифицировать эти элементы?

В работе [8] представлены результаты экспериментального обнаружения колебаний зерен в Ст. 45 при высокоскоростном соударении плоских образцов с ударниками в виде «стаканчика», метаемых из пневматической пушки с начальными скоростями соударения $v_0 = 200 \div 400$ м/с. Колебания зафиксированы методом регистрации движения свободной поверхности образцов лазерным дифференциальным интерферометром. Типичная интерферограмма для образцов из Ст. 45 приведена на рис. 1, период осцилляций $T = 32\text{—}36$ нс.

В Ст. 40Х ударное возбуждение носило аperiодический характер, вследствие чего при смене знака ускорения на профиле импульсов скорости происходили резкие перепады интерференционного сигнала, не переходящие, однако, в колебания. При испытаниях в этой же серии экс-

¹ Публикуется в порядке дискуссии.

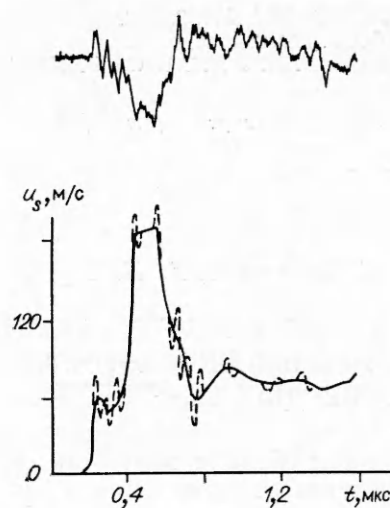


Рис. 1.

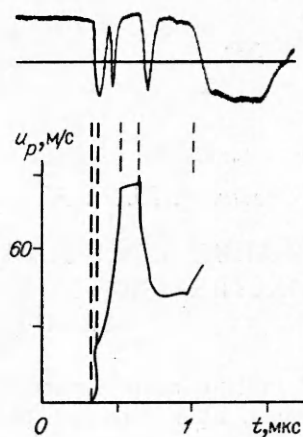


Рис. 2.

периментов алюминия марки АВ-0 и алюминиевых сплавов АМгб и Д16Т осцилляций зерен зарегистрировать не удалось.

Отобранные от этой партии образцы использованы в качестве мишеней для медных пластичных ударников, летящих со скоростью ~ 3 км/с. После их внедрения в мишени последние подвергали электронно-микроскопическому исследованию, показавшему, что в Ст. 45 характер пластического течения вихревой с поперечным размером вихря (внешнего масштаба турбулентности [9]) $l_t \approx 120$ мкм (рис. 2). Аналогичные вихри наблюдались и в алюминии и алюминиевых сплавах: АВ-0 (рис. 3), АМгб (рис. 4) и Д16Т (рис. 5). Эти вихри фиксировались рядом с краем каверны, начиная, примерно, с $1/3$ ее глубины от поверхности соударения. Отсутствие вихрей на начальном этапе внедрения ударников, вероятно, можно объяснить высокой скоростью последних, при которой материал мишеней либо не успевал реагировать на внешнее воздействие,

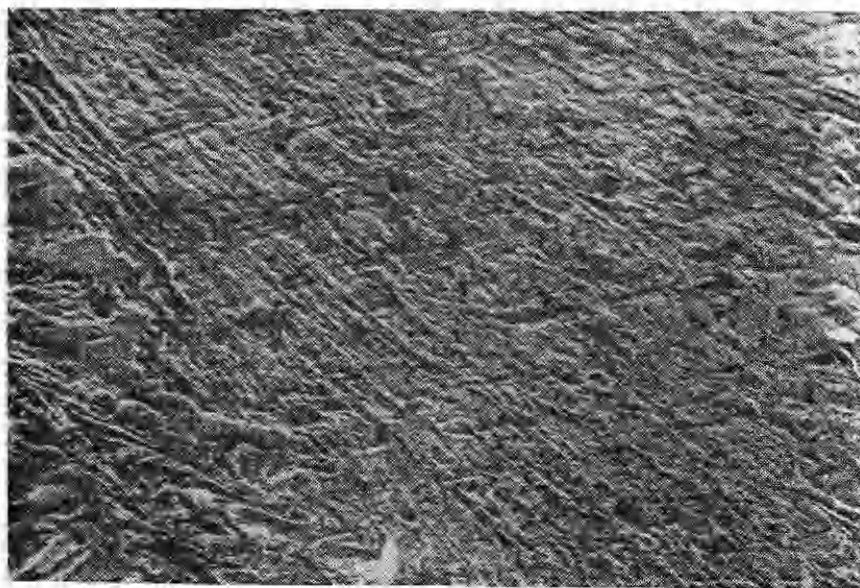


Рис. 3.

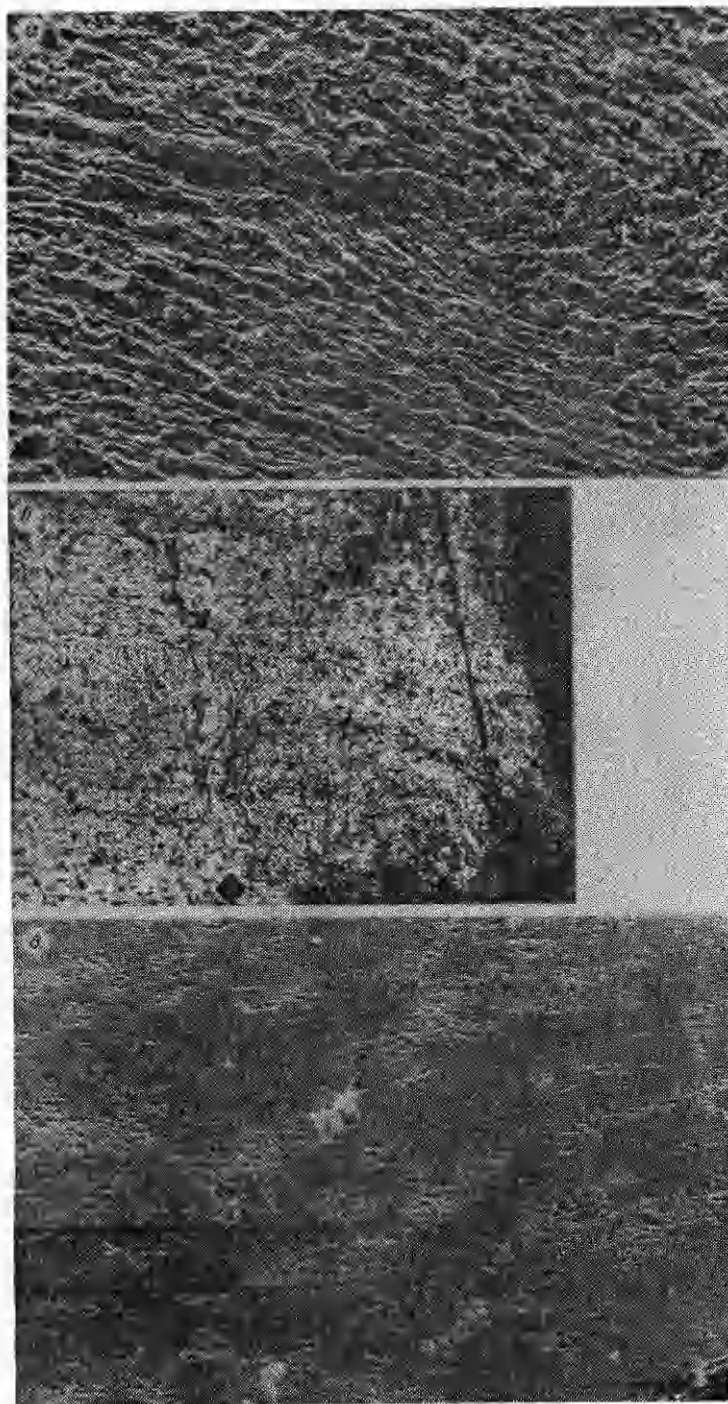


Рис. 4.

либо переходил в бесструктурное состояние с последующим восстановлением структуры, близкой к исходной.

Значение l_t для Ст. 45 хорошо совпадает с расчетной величиной из зависимости

$$l_t \sim c_t T, \quad (1)$$

где c_t — скорость пластической волны сдвига ($l_t = 103 \div 116$ мкм). Внешний масштаб турбулентности в сплавах АВ-0, АМг6 и Д16Т был равен 40, 400, 50 мкм соответственно.

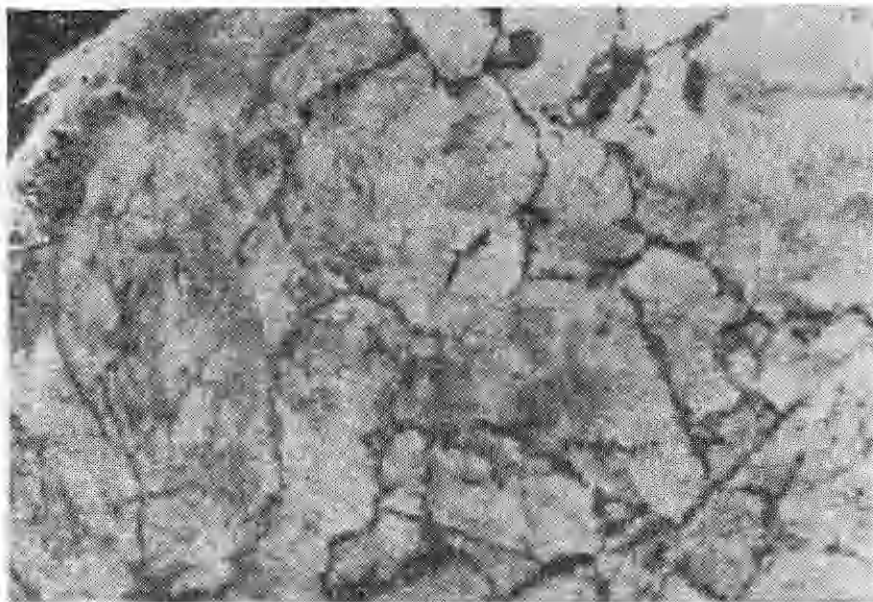


Рис. 5.

Чтобы судить о связи между колебаниями зерен и развитием вихревого характера пластической деформации, необходимо иметь данные о влиянии этих процессов на макрохарактеристики материалов. С этой целью проведены оценочные расчеты колебательного режима зерен в Ст. 45 и их сравнение с результатами расчетов, полученными из рассмотрения вихревых зон в преградах (см. рис. 2).

В [6] оценен коэффициент динамической вязкости μ Ст. 45 при ударных нагружениях плоских образцов из равенства энергии колебательного движения осциллятора с трением и запасенной упругой энергии вязкоупругого тела в модели Максвелла, которая находит широкое применение при описании динамического поведения сплошной среды [10]. Полученное в [8] значение $\mu = 2,7 \cdot 10^3$ Па·с хорошо согласуется с оценками μ для Ст. 45 [11].

Оценим параметры колебательного процесса и коэффициенты динамической вязкости в алюминиевых сплавах, в которых интерферометрическим методом колебания зерен зафиксировать не удалось, но следы вихревой деформации после внедрения пластичных ударников в них наблюдались. Из (1) следует, что период колебаний зерен в сплавах Д16Т, АМг6 и АВ-0 соответственно равен 16,2, 133 и 13 нс. Возникает вопрос, какую модель поведения материала выбрать при высокоскоростном внедрении с $v_0 \simeq 3$ км/с? Дело в том, что при таких скоростях материал мишени последовательно находится в жидком (бесструктурное состояние), вязкопластическом, вязкоупругом и т. д. состояниях [12]. Оценим коэффициент динамической вязкости для двух из них.

Для вязкопластического тела Шведова — Бингама исходим из того, что мощность колебательного движения расходуется на вязкое движение частиц материала [13], т. е.

$$W = W_0 \exp(-2\lambda t) = 0,5(\mu u^2/h + \sigma_0 u), \quad (2)$$

где ρ — плотность материала мишени; c_p — скорость пластической волны; t — время; u — средняя скорость движения частиц материала; h — ширина зоны пластической деформации; σ_0 — предел текучести материала. Коэффициент затухания λ принимаем равным коэффициенту затухания в полуэмпирической формуле, полученной при определении параметров УВ в преградах с помощью размещенных в них пьезокварцевых

Материал	σ_0 , МПа	δ , %	d , мкм	$\mu_{\text{п}}$, Па·с	$\mu_{\text{у}}$, Па·с
Ст. 45	330	13,6	113	—	$2,7 \cdot 10^3$
Ст. 40Х	415	7,7	40	—	—
АМг6	200	22,5	20	$4,6 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$
				$3 \cdot 10^3$	
Д16Т	340	6,4	36	$8 \cdot 10^2$	$10,4 \cdot 10^3$
				25	
АВ-0	160	32	—	$5,1 \cdot 10^2$	$6,4 \cdot 10^3$
				20	

Примечание. В числителе — значение вязкости преграды при $t = 0,5$ мкс, в знаменателе — при $t = 1$ мкс; σ_0 — предел текучести, δ — относительное удлинение, d — диаметр зерна.

Датчиков:

$$\frac{u}{u_0} = \frac{r_0}{r} \exp(-\alpha c_p t), \quad r_0 = h_0 / 2 \operatorname{tg} \alpha_0,$$

α_0 — угол разгрузки; h_0 — толщина ударника. Очевидно, что в этом случае

$$\lambda = 0,5 \alpha c_p. \quad (3)$$

Для преград из алюминиевых сплавов (АМгЗ, АМг6, АВ-0, Д16Т, В95) $\alpha = (0,5 \div 7) \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$. Большой разброс значений α , вероятно, объясняется широким спектром свойств исследованных материалов. Подставляя в (3) $W_0 = 0,5 \rho v_0^2 c_p$ и разрешая его относительно μ с учетом (4), получим

$$\mu = \frac{\rho c_p v_0^2 \exp(-\alpha c_p t) - \sigma_0 u}{u^2}. \quad (4)$$

Для вязкоупругого тела Максвелла, аналогично работе [8], находим

$$\mu = G/\lambda = 2G/\alpha c_p. \quad (5)$$

Рассчитанные значения μ по (4), (5) приведены в таблице вместе с механическими характеристиками материалов. Видно, что величины μ с достаточной хорошей точностью совпадают с данными [11, 14]. Это позволяет сделать вывод о вероятности того, что высокочастотные затухающие колебания зерен металла, возникающие в результате ударного нагружения, инициируют возникновение турбулентного (вихревого) пластического течения металлов при высокоскоростной деформации и интенсивных давлениях.

Отсутствие фиксации колебаний зерен у алюминиевых сплавов может быть связано с фокусировкой лазерного луча в экспериментах, поскольку система настройки обеспечивала минимальные размеры луча в пределах 70—80 мкм и только в этом случае мог регистрироваться отклик единичного зерна (если его средний размер был соизмерим с диаметром зондирующего луча). При расфокусировке луча диаметр последнего возрастал до 350—400 мкм и интерференционный сигнал определялся суммарным откликом множества зерен, что при взаимодействии случайных фаз их колебательного движения приводило к потере контрастности сигнала и отсутствию фиксации колебаний. Второй причиной может быть высокая частота колебаний и ограниченные возможности в связи с этим регистрирующей аппаратуры.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что высокочастотные колебания зерен могут служить вероятной причиной возникновения турбулентного пластического течения в металлах преград при высокоскоростном внедрении пластичных ударников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел.— Новосибирск: Наука, 1985.
2. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов.— М.: Металлургия, 1986.
3. Диваков А. К., Коханчик Л. С., Мещеряков Ю. И. и др. ПМТФ, 1987, 3, 135.
4. Барахтин Б. К., Савенков Г. Г. // Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф.— Л., 1986.
5. Владимиров В. И. // Вопросы теории дефектов в кристаллах.— Л., 1987.
6. Ханнаков Ш. Х. ФММ, 1988, 65, 1, 44.
7. Неймарк Ю. И., Ланда П. С. Стохастические и хаотические колебания.— М.: Наука, 1987.
8. Савенков Г. Г., Мещеряков Ю. П., Васильков В. Б. // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов.— Куйбышев, 1989.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика.— М.: Наука, 1988.
10. Годунов С. К. Элементы механики сплошной среды.— М.: Наука, 1978.
11. Степанов Г. В. ПМТФ, 1982, 1, 150.
12. Сагомоян А. Я. Проникание.— М.: Изд-во МГУ, 1974.
13. Мещеряков В. И. Поверхность, 1988, 3, 101.
14. Голубев В. К. ПМТФ, 1983, 6, 159.

г. Ленинград

Поступила в редакцию 11/IV 1989

УДК 662.215

*Б. С. Ермолаев, В. А. Фотеевков, Б. А. Хасаинов,
А. А. Сулимов, С. Е. Малинин*

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ВО ВЗРЫВ В ЗЕРНЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Предотвращение перехода горения во взрыв (ПГВ) и детонацию в аварийных ситуациях — актуальная проблема производства, хранения и транспортировки твердых ВВ. Для ее решения необходимо расширить знания о природе и механизмах, обеспечивающих катастрофическое ускорение горения при аварийных взрывах. Большую пользу может принести разработка новых модельных подходов, позволяющих переносить на натурные взрывы результаты лабораторных измерений и численного моделирования.

Ранее [1] ПГВ в твердых ВВ изучался в основном применительно к условиям замкнутой прочной оболочки. Однако в аварийных ситуациях чаще всего исходный очаг горения возникает в ВВ, имеющем свободные поверхности либо окруженном малопрочной оболочкой или мягким упаковочным материалом. В результате развитие горения в очаге уже на начальной стадии испытывает интенсивное воздействие разгрузки из-за разлета ВВ, окружающего очаг. Особенно большой эффект дает действие разгрузки, когда горение в очаге протекает в послойном режиме либо когда возникшее конвективное горение еще недостаточно интенсивно. При этом критические условия ПГВ, фиксируемые по массе ВВ, давлению в очаге горения, прочности оболочки и т. д., а также время развития взрыва могут изменяться в широких пределах.

Отмеченные особенности процесса должны адекватно воспроизводиться при моделировании и регистрации критических условий аварийных (крупномасштабных) взрывов. Традиционные методы, применяемые для измерения параметров, характеризующих склонность ВВ к ПГВ, например длины преддетонационного участка [1], не отражают в полной мере это обстоятельство. Указанной цели лучше всего соответствует

© 1990 Ермолаев Б. С., Фотеевков В. А., Хасаинов Б. А., Сулимов А. А., Малинин С. Е.