

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шепери Р. А. Вязкоупругое поведение композиционных материалов. Механика композиционных материалов/Под ред. Дж. Сендечки.— М.: Мир, 1978.— С. 102—195.— Т. 2.
2. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах.— М.: ИЛ, 1955.
3. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров.— М.: ИЛ, 1963.
4. Малкин А. Я., Аскадский А. А., Коврига В. В. Методы измерения механических свойств полимеров.— М.: Химия, 1978.
5. Большаков А. П., Володина Л. В., Новиков С. А. и др. Экспериментально-расчетное исследование вязкоупругопластических характеристик поликарбоната при импульсном нагружении. Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация решения задач упругости и пластичности.— Горький: Горьк. ун-т, 1984.— С. 121—124.
6. Иванов А. Г., Новиков С. А., Спницын В. А. Исследование поведения замкнутых стальных оболочек при взрыве внутри них зарядов взрывчатого вещества // ПМТФ.— 1968.— № 6.— С. 94—98.
7. Бузуков А. А. Особенности поведения стенок взрывных камер под действием импульсной нагрузки // ФГВ.— 1976.— 12, № 4.— С. 605—610.
8. Адисев В. В., Корнев В. М. К расчету оболочек взрывных камер // Там же.— 1979.— 15, № 6.— С. 108—114.
9. Корнев В. М., Адисев В. В., Митрофанов А. П. и др. Экспериментальное исследование и анализ колебаний оболочки взрывной камеры // Там же.— С. 155—157.
10. Абакумов А. И., Егунов В. В., Иванов А. Г. и др. Расчетно-экспериментальное исследование деформации оболочек взрывных камер // ПМТФ.— 1984.— № 3.— С. 127—130.
11. Белов А. И., Клаповский В. Е., Корнило В. А. и др. Динамика сферической оболочки при несимметричном внутреннем импульсном нагружении // ФГВ.— 1984.— 20, № 3.— С. 71—74.
12. Белов А. И., Беляев В. М., Корнило В. А. и др. Расчет динамики нагружения стенки сферической взрывной камеры // Там же.— 1985.— 21, № 6.— С. 132—135.
13. Луговой П. З. О влиянии характера импульсного нагружения на динамику оболочек // Докл. АН УССР. Сер. А. Физ.-мат. и техн. науки.— 1990.— № 2.— С. 43—46.
14. Абакумов А. И., Дубовкин А. С., Певпицкий А. В. и др. Расчетно-экспериментальное исследование реакции сферической взрывной камеры // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов.— 1989.— Вып. 1.— С. 3—7.
15. Крылов А. П. О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики.— М.: Л.: Изд-во техн.-теорет. лит., 1950.
16. Зотов Е. В., Красовский Г. Б., Кручинин В. А. и др. Скорость детонации некоторых взрывчатых растворов на основе тетранитрометана и фторнитроформа // ФГВ.— 1980.— 16, № 1.— С. 148—151.
17. Зотов Е. В., Козырев А. С., Бабадей С. М. и др. Иницирование детонации растворов нитробензола в тетранитрометане в канале электрического искрового разряда // Там же.— 1982.— 18, № 4.— С. 110—114.
18. Харкевич А. А. Спектры и анализ.— М.: Изд-во техн.-теорет. лит., 1957.
19. Елисеев Г. М. L-сплайны, порождаемые уравнениями с постоянными коэффициентами. Физическая механика неоднородных сред/Под ред. Г. В. Гадяка.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1984.— С. 146—153.
20. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов.— Киев: Наук. думка, 1971.

г. Арзамас

Поступила в редакцию 22/VIII 1991

УДК 531.38

Г. А. Адагуров, А. Ф. Беликова, С. Н. Буравова

### ОБ «АНОМАЛЬНЫХ» ЯВЛЕНИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ИМПУЛЬСНОЕ НАГРУЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Распространенное мнение относительно аномального поведения массопереноса и сверхглубокого проникания частиц в преграду при импульсном нагружении объясняется неучетом процессов повреждаемости, которые сопровождают упрочнение поверхностного слоя. Канальные области разуплотнения или нарушения сплошности возникают под зоной приложения нагрузки и обязаны фокусировке боковых волн разгрузки.

Известно, что импульсное нагружение активизирует процессы массопереноса. Изучение структуры поверхностных слоев после механической, электромагнитной и электронскровой импульсных обработок привело авторов [1—3] к выводу об аномальном поведении диффузии: величина коэффициента диффузии на 6—7 порядков превосходит его значение в жидкости. При этом подвижность атомов возрастает с понижением температуры, а для обычного массопереноса характерна обратная зависимость. Плотная упаковка атомов в ГЦК-решетке приводит к более высоким коэффициентам диффузии, чем рыхлая ОЦК-решетка.

Точка зрения на аномальное поведение массопереноса получила поддержку специалистов по газотермическому напылению. Измерение концентрационных кривых переходной зоны детонационных покрытий [4, 5] обнаруживает взаимное проникновение материалов подложки и частиц на большие глубины. При напылении стало возможным проникновение железа в алюминий, хотя в равновесных условиях растворение железа в алюминии отсутствует. Изучение поверхностей разрушения плазменных покрытий путем нормального отрыва [6] также позволило авторам высказать мнение об аномально высоких коэффициентах диффузии при плазменном напылении.

К аномальным явлениям следует отнести эффект Ушеренко [7], получивший название сверхглубокого проникания частиц. С момента его обнаружения ведутся споры по поводу этого феномена. Эффект наблюдается, когда поверхность образца подвергается воздействию потока частиц, разгоняемых с помощью кумулятивного заряда ВВ. Размер частиц порошка при этом составляет 10—100 мкм, скорость удара до 1—1,5 км/с, как и при детонационном напылении. После обработки поверхности потоком частиц в образце наблюдаются каналные формообразования, напоминающие неплотно закрытые трещины. Глубина их проникновения может достигать тысячи калибров и выше. Некоторые из них оканчиваются полостями, в которых обнаруживаются «объекты обтекаемой формы. Только предположительно можно угадывать в них остатки микроударников» [7]. Канальные образования трактуются как траектории проникающих в глубь частиц.

Следует заметить, что проникновение частиц в твердое тело на столь большие расстояния противоречит законам сохранения импульса и энергии. Чтобы как-то объяснить наблюдаемый эффект, материал преграды после импульсного нагружения наделяется удивительными свойствами: «неограниченной» прочностью на сдвиг при конечной прочности на нормальный отрыв [8], аномально низкой сопротивляемостью движению частиц [9], локальным разупрочнением среды [10]. Высказывается мнение о захвате частиц порошка фронтом ударной волны (УВ), которая транспортирует частицу внутри твердого тела [11].

Анализ литературных данных показывает, что во всех случаях обнаружения аномальности поверхность образца подвергалась импульсному нагружению ударниками ограниченных размеров. Особенности взаимодействия таких ударников с преградой изучены слабо.

**Исследование взаимодействия преграды с ударником ограниченных размеров** проводилось по классической схеме одномерного откола путем соударения образца с пластиной. Отличие заключалось в форме ударника. На поверхности пластины со стороны, обращенной к образцу, размещались три брускообразных или кольцевых выступа, которые моделировали соударение частиц. Материал ударника — алюминий, диаметр пластины 60 мм, толщина 2 мм, сечение выступов  $1 \times 1$  мм. Пластина разгонялась зарядом гексогена насыщенной плотности массой 150 г, что обеспечивало пластине скорость удара  $\sim 1$  км/с.

На рис. 1 приведена фотография поперечного шлифа образца после удара пластиной. Соударение приводит к образованию на поверхности трех кратеров (приведены только два). Под зоной контакта каждого из них обнаруживается продольная трещина. Центральная трещина пронизывает весь образец, ширина ее не постоянна, имеются тонкие питевид-

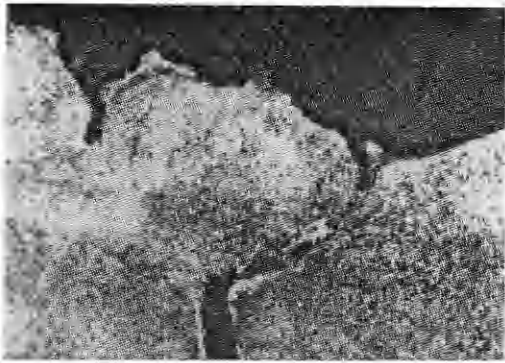


Рис. 1. Поперечный шлиф стального образца после нагружения пластиной с тремя брускообразными выступами; Neophot-3,  $\times 25$ .



Рис. 2. Внутренняя повреждаемость в виде отделяющейся полоски (а) и спирали (б):  $\times 500$ .

ные участки и просторные камеры. На формирование центральной продольной трещины оказывают влияние импульсы, создаваемые соседними выступами. Максимальная ширина центральной трещины не превышает 500—700 мкм.

Структура материала, первоначально состоящая из перлитовых зерен, окружающих сеткой феррита, испытывает изменения в поверхностном слое, микротвердость его возрастает. Сильные пластические трения при формировании трещины вытягивают зерна и сетку, материал становится текстурированным. Края трещины состоят из белой нетравящейся оторочки, рыхлость, пористость которой характерны для продольной повреждаемости. Аналогичное осветление перлитных зерен в результате импульсного нагружения сталей наблюдали ранее. Существует мнение [12], что осветленные зерна представляют собой пересыщенный раствор углерода в железе с содержанием углерода до 0,8 %.

Обращает на себя внимание другая особенность, сопровождающая формирование продольной трещины. На многих участках трещины внутренняя оболочка отслаивается (рис. 2, а). Отделившиеся полоски имеют тенденцию к скручиванию (рис. 2, б), что свидетельствует об их напряженном состоянии. Внутреннее разрушение приводит к заполнению трещины осколками различной формы.

Возникновение продольной канальной повреждаемости в результате импульсного нагружения поверхности — явление общее и неоднократно ранее наблюдавшееся экспериментально (например, импульсное лазерное облучение поверхности [13], удар диска [14] или струи воды [15], взрыв заряда ВВ на поверхности [16]). При эрозионном изнашивании поверхности под действием потока частиц [17] во впадинах рельефа поверхности обнаруживаются поры, пустоты, распространяющиеся в глубь материала в виде микротрещин. Электроэрозионная обработка создает на поверхности кратеры, структура подповерхностного слоя принципиально неоднородна. Методом дифракционной электронной микроскопии установлено более-менее равномерное чередование упрочненных микрообъемов с менее упрочненными [18].

Причину появления продольной повреждаемости в результате импульсного нагружения следует искать в особенности высокоскоростного деформирования преграды и в волновом характере проявления сжимаемости твердого тела. Продольная трещина обусловлена наличием волн разгрузки, возникающих одновременно с импульсами сжатия. Фокусировка волн разгрузки, источником которых являются боковые грани частицы, создает канальные области высоких растягивающих напряжений как в частице, так и в преграде.

В работе [19] образование канального фокусируемого откола под зоной контакта названо эффектом «ужаления», который принципиально отличает низкоскоростное внедрение в преграду индентора от высокоскоростного, которому сопутствует сжимаемость твердого тела.

**Аналитическое рассмотрение соударения брускообразной частицы с преградой.** Торможение частицы при ударе создает импульсы сжатия в частице и в преграде. Свободное пространство, куда входит УВ, служит источником центрированной волны разгрузки, снижающей интенсивность фронта и искривляющей его форму. Используя результаты и подход работы [20], где методом характеристик решена задача взаимодействия УВ с отраженной от свободной поверхности волной разгрузки, можно показать, что каждое состояние на фронте искривленной УВ перемещается в пространстве по прямолинейным траекториям. Угол наклона таких траекторий к лицевой поверхности преграды  $\psi$  можно определить через малый параметр  $\sigma$ :

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{1 + 2\sqrt{\sigma\sigma_0} - 0,5\sigma_0 - \sigma}{\sqrt{\sigma_0} - 2\sqrt{\sigma}}. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_0 = \frac{n+1}{2} \frac{u_0}{c_0}$ ;  $\sigma = \frac{u+c-c_0}{c_0} = \frac{n+1}{2} \frac{p}{\rho_0 c_0^2}$ ;  $u, u_0$  — массовые скорости за фронтом искривленной и невозмущенной УВ;  $c, c_0$  — скорость звука сжатого и исходного материала;  $p$  — давление;  $\rho_0$  — исходная плотность материала;  $n$  — показатель политропы сжимаемости. Все характеристики потока за фронтом УВ могут быть выражены через параметр  $\sigma$  [21].

Из выражения (1) следует, что импульс сжатия в частице и в преграде распространяется внутри конической поверхности, угол которой  $\psi_0$  определяется подстановкой в (1)  $\sigma = 0$ . Если угол наклона боковой грани частицы  $\varphi_0 < \psi_0$ , интенсивность УВ на боковой грани  $\sigma_b$  отлична от нуля.  $\sigma_b$  определяется из (1) подстановкой  $\psi = \varphi_0$ . В этом случае УВ перемещается вдоль боковой грани с постоянной скоростью. Из-за наклонного положения фронта УВ к грани скорость звука сжатого материала оказывается меньше скорости распространяемого фронта [20]. Давление  $p_b$  снижается до нуля в отраженной волне разгрузки, источник которой — боковая грань частицы (вторая волна разгрузки). Таким образом, разгрузка сжатого материала при ударе частицы с  $\varphi_0 < \psi_0$  происходит двухступенчато — в двух волнах разгрузки.

Встреча волн разгрузки приводит к быстрому затуханию фронта УВ и образованию под зоной контакта канальной области высоких растягивающих напряжений [13], локализуемой вдоль оси конуса сжимаемости. Численный расчет интерференции волн разгрузки в брускообразной частице показывает, что параметры потока слабо зависят от координаты. Это дает возможность аналитически определить затухание фронта УВ в зоне интерференции и оценить глубину, на которой УВ вырождается в упругую, и пластическое деформирование материала, в результате которого происходит упрочнение поверхностного слоя, прекращается.

В координатах  $X = x/\tau - 1$ ,  $Y = (1 - y)/\tau$  [20] (здесь  $X, Y$  отнесены к полуширине основания частицы  $r_0$ ,  $\tau = c_0 t / r_0$  — безразмерное время) уравнения формы искривленного фронта УВ и цилиндрических характеристик первой волны разгрузки оказываются не зависящими от времени:

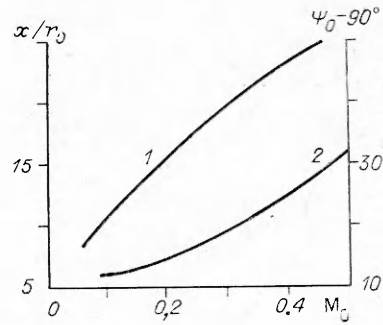
$$X = \frac{\sigma_0}{4} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_0} Y - \frac{s}{4} Y^2 \quad \text{и} \quad X + \frac{1}{2} Y^2 = \sigma.$$

Уравнение траектории точки пересечения фронта УВ с характеристикой волны разгрузки  $\sigma$ :

$$x = (1 + X)\tau = (1 + 2\sqrt{\sigma\sigma_0} - 0,5\sigma_0 - \sigma)\tau,$$

$$y = (1 - Y)\tau = 1 - (2\sqrt{\sigma} - \sqrt{\sigma_0})\tau$$

Рис. 3. Зависимости толщины зоны упрочнения (2) и угла конуса сжимаемости (1) от числа Маха.



после исключения  $\tau$  принимает вид

$$y = 1 + x/\operatorname{tg} \psi.$$

Аналогично выражение для точки пересечения фронта с головной характеристикой встречной волны разгрузки:

$$y = -1 + x\sqrt{\sigma_0}/(1 + 0,5\sigma_0).$$

При условии независимости параметров потока в зоне интерференции воли разгрузки от координаты их значения совпадают с величинами той характеристики  $\sigma$ , которая в данный момент времени встречается с головной характеристикой встречной волны. Толщина зоны влияния удара, т. е. толщина упрочненного слоя, определяется совместным решением двух уравнений траекторий состояния для  $\sigma$  и  $\sigma_0$ :

$$x \left[ \frac{\sqrt{\sigma_0}}{1 + 0,5\sigma_0} + \frac{2\sqrt{\sigma} - \sigma\sqrt{\sigma_0}}{1 + 2\sqrt{\sigma\sigma_0} - 0,5\sigma_0 - \sigma} \right] = 2. \quad (2)$$

Толщина упрочненного слоя определяется подстановкой в (2)  $\sigma = \sigma_{\Gamma}$ , где  $\sigma_{\Gamma} = (n + 1) p_{\Gamma}/(2\rho_0 c_0^2)$  соответствует динамическому пределу упругости Гюгонио.

Рис. 3 иллюстрирует изменение толщины упрочненного слоя от безразмерной скорости удара  $M_0 = v_0/c_0$  (в расчете принималось  $\sigma_{\Gamma} = 0,03$ ). Здесь же приведена зависимость для угла конуса сжимаемости  $\psi_0$ . С ростом скорости удара зона упрочнения в поверхностном слое возрастает как за счет увеличения глубины, где УВ затухает и вырождается в упругую, так и за счет увеличения раствора конической поверхности, в которой распространяется импульс сжатия.

Образование канальной области высоких растягивающих напряжений вдоль оси конуса сжимаемости обуславливается встречей боковых волн разгрузки. Именно вторая волна сообщает материалу поступательную скорость  $u_B = 2c_0\sigma_B/(n + 1)$ , радиальная составляющая которой  $v$  производит растяжение в зоне интерференции волн разгрузки. Глубина проникновения продольной канальной повреждаемости  $L_0$  находится из критерия разрушения на конце канала. В качестве последнего выбирается условие превышения радиальной составляющей скорости растяжения критической величины  $u^*$ . Для канального макрооткола  $u^*$  определяется откольной прочностью материала  $P_*: u^* = p_*/\rho_0 c_0$ , для микрооткола  $u^* = 2c_0\sigma_{\Gamma}/(n + 1)$ . При микроотколе в зоне интерференции волн разгрузки имеет место пластическое деформирование, которое создает зародыши нарушения сплошности, но разделения материала не происходит.

Микротрещина характеризуется пористостью, трещиноватостью. Радиальная составляющая скорости растяжения  $v$  определяется как составляющей массовой скорости за искривленной УВ, так и составляющей в отраженной боковой волне разгрузки:

$$v = u_B [\cos(\varphi_0 - 90) + \sqrt{\sigma_0} - \sqrt{\sigma_B}].$$

Глубину проникновения продольной канальной повреждаемости находим из выражения

$$L_0 = \operatorname{tg} \arccos \frac{u^*}{v},$$

которое показывает, что увеличение угла наклона приводит к уменьшению глубины канального откола. Когда угол наклона боковой грани частицы превышает угол конуса сжимаемости, продольная повреждае-

мость не возникает. Имеется критическая скорость, превышение которой приводит к появлению капального откола в процессе однократного нагружения. Критическая скорость удара зависит от расположения боковых градей частицы, и для частицы с прямоугольным сечением ( $\varphi_0 = 90^\circ$ ) в данных условиях  $M_0^* = 0,199$ .

Следует обратить внимание на тот факт, что глубина капальной повреждаемости зависит от геометрии, скорости удара и размера частицы, в то время как толщина упроченного слоя — только от скорости и размера частиц.

**Обсуждение результатов.** Экспериментальное обнаружение продольной повреждаемости и аналитическое рассмотрение ее образования позволяют объяснить аномальные явления, сопутствующие импульсному нагружению поверхности.

Газодинамическая повреждаемость образует в упроченном слое под зоной контакта ослабленные места, по которым однородный материал внедряется в преграду. При изучении процесса электроэрозионного упрочнения поверхности [1—3] впервые обратили внимание на интенсивный массоперенос, а разуплотненные микрообъемы обнаруживаются экспериментально [18]. Процесс принудительного силового внедрения материала по вполне определенным направлениям, возникновение которых подчиняется законам волновой механики, не диффузионный, поэтому и появляется аномальность в коэффициентах при описании принудительного массопереноса диффузионным механизмом.

Изучение динамики формирования детонационных покрытий [22] позволило обнаружить эффект эрозионного разрушения, сопутствующий напылению. Осколки основы от разрушения выступов рельефа поверхности смешиваются с напыляемым материалом, и эта смесь подвергается прессованию потоком частиц. Обращает на себя внимание, что размер частиц небольшой, меньше электронного зонда, применяемого при определении концентрационных кривых [4, 5]. Эффект эрозионной повреждаемости и есть тот механизм, который поставляет материал подложки в покрытие. Последний не может быть описан диффузионным механизмом.

При изучении разрушения детонационных покрытий путем нормального отрыва, аналогичном проведенному в [6] для плазменного покрытия, также обнаружены на поверхности разрушения со стороны покрытия частички металла основы. Однако присутствие материала основы не определяется диффузионным процессом проникновения металла в покрытие. Сечение разрушения проходит через выступы рельефа поверхности основы, в вершинах которых образовались поперечные области высоких растягивающих напряжений [23]. Поперечная повреждаемость — другой вид откольного разрушения, возникающий при импульсном нагружении потоком частиц. Он характерен для стационарной стадии эрозионного изнашивания поверхности, в то время как рассматриваемый в данной работе эффект «ужаления» — основной на начальной стадии, и это подтверждается прямыми экспериментальными измерениями [17].

Что же касается эффекта Ушеренко, то наблюдаемые формообразования не траектории частиц, а капальный фокусируемый откол. Однако «сверхглубина» обязана не порошкообразной среде, помещаемой в кумулятивную выемку, а осколкам облицовки, следующими за микрочастицами. При отсутствии металлической облицовки эффект сверхглубокого проникания не наблюдается, как и при детонационном напылении. Обнаружение объектов обтекаемой формы связано с внутренним разрушением при формировании продольной трещины. Отслоение внутренней облицовки капальной трещины обязано продольному множественному отколу, возникающему в результате периодического характера отражения волн разгрузки.

Таким образом, процесс импульсного нагружения ударниками ограниченных размеров имеет своим следствием двойное воздействие на ма-

тернал. С одной стороны, происходит упрочнение, с другой — одновременно с упрочнением возникают разупрочненные области в виде канальных микро- или макротрещин. Природа продольной повреждаемости — откольная — обязана фокусировке боковых волн разгрузки, сопровождающих возникновение импульсов сжатия при ударе частиц. Причина кажущейся аномальности — неучет продольной повреждаемости при импульсном нагружении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лариков Л. Н., Фальченко В. М., Мазанко В. Ф. и др. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов // Докл. АН СССР.— 1975.— 221, № 5.— С. 1073—1075.
2. Герцрикер Д. С., Кривко В. П., Лариков Л. Н. и др. Ускорение диффузионных процессов в железе при многократном ударном нагружении // Физика и химия обработки материалов.— 1979.— № 4.— С. 154—156.
3. Лариков Л. Н., Мазанко В. Ф., Немошколеко В. В. Исследование аномального массопереноса в условиях ударного нагружения разнородных металлов // Там же.— 1981.— № 4.— С. 133—135.
4. Шмырева Т. П. Физико-химические превращения в порошкообразных материалах при детонационногазовой обработке // Химическая физика процессов горения и взрыва.— Черноголовка, 1980.— С. 119—121.
5. Шмырева Т. П. Физико-химические превращения при детонационногазовом напылении порошков // ФГВ.— 1983.— 19, № 5.— С. 143—146.
6. Борисова А. А., Миц И. В., Емельянов Е. А. и др. Структура и свойства покрытий из композиционных порошков на основе нихрома // Достижения в области газотермических покрытий.— Апатиты, 1989.— С. 155—161.
7. Козорезов К. И., Макененко В. И., Ушеренко С. М. Исследование эффекта взаимодействия дисперсных микрочастиц с твердым телом // Избранные вопросы современной механики/Под ред. Г. Г. Черного.— М.: МГУ, 1981.— Ч. 1.— С. 115—119.
8. Григорян С. С. О природе «сверхглубокого» проникновения твердых микрочастиц в твердые материалы // Докл. АН СССР.— 1987.— 292, № 6.— С. 1319—1323.
9. Черный Г. Г. Механизм аномально низкого сопротивления при движении тел в твердых средах // Там же.— С. 1324—1328.
10. Альшулер Л. В., Андилевко С. К., Ушеренко С. М. и др. О модели сверхглубокого проникновения // Письма в ЖТФ.— 1989.— 15, вып. 5.— С. 55—57.
11. Симоненко В. А., Скоркин Н. А., Башуров В. В. О проникновении отдельных микрочастиц в прочные преграды при столкновении с ними порошкообразных потоков // ФГВ.— 1991.— 27, № 3.— С. 46—51.
12. Козорезов К. И., Миркин М. Е., Скугоров Н. А. и др. Насыщение поверхности металлов соединениями и твердыми растворами, синтезированными в ударной волне // Докл. АН СССР.— 1973.— 210, № 6.— С. 1067—1070.
13. Беликова А. Ф., Буравова С. Н., Гончаров А. А. и др. Газодинамический аспект эрозии при импульсном нагружении поверхности твердого тела // Поверхность.— 1989.— № 10.— С. 134—139.
14. Беляков Л. В., Златин Н. А. О деформировании и разрушении металлических массивных тел под действием кратковременного давления // ЖТФ.— 1966.— 36, вып. 2.— С. 358—364.
15. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел.— М.: Машиностроение, 1968.— С. 544.
16. Бушман А. В., Канель Г. П., Ни А. А. и др. Теплофизика и динамика интенсивных воздействий.— Черноголовка, 1988.— С. 209.
17. Brown R., Kosco S., Jun J. E. The effect of particle shape and size on erosion // Wear.— 1983.— 8.— P. 181—193.
18. Спасский М. Н., Зюзя Ю. Ф., Фотеев Н. К. и др. О природе упрочнения электроэрозионной обработкой поверхностных слоев образцов среднеуглеродистых сталей 45 и Х12М // Физика и технология упрочнения поверхности металлов.— Л.: ФТИ им. Иоффе, 1985.— С. 62—66.
19. Буравова С. Н. Эффект фокусировки волн разгрузки при воздействии ударников ограниченных размеров // Письма в ЖТФ.— 1989.— 15, № 17.— С. 63—67.
20. Гриб А. А., Рябинин Л. Г., Христианович С. А. Об отражении плоской ударной волны в воде от свободной поверхности // ПММ.— 1956.— № 4.— С. 532—544.
21. Буравова С. Н. Образование второй ударной волны при соударении частиц при детонационном напылении // ФГВ.— 1985.— 21, № 5.— С. 107—113.
22. Буравова С. Н. Массоперенос при детонационном напылении. Порошковая металлургия. Респуб. межвед. сб. науч. тр.— Минск: Высш. шк., 1988.— Вып. 12.— С. 4—9.
23. Буравова С. Н., Гончаров А. А., Колбасов Д. В. и др. О природе адгезионной связи детонационных покрытий с подложкой: Материалы Всесоюз. семинара «Достижения в области технологии газотермических покрытий».— Апатиты, 1989.— С. 118—131.

*п. Черноголовка*

*Поступила в редакцию 25/XI 1991*