

05

## **Влияние поверхностных волн на взаимодействие налетающих частиц с поверхностью материала**

© М.А. Чертов, А.Ю. Смолин, Г.А. Сапожников, С.Г. Псахье

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

E-mail: maks@usgroups.com, maks@isms.tsc.ru

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 23 июня 2004 г.

На основе компьютерного моделирования рассмотрен налет двух частиц на тонкую пластину. Исследовалось влияние возбуждаемых в результате соударения волн на взаимодействие частиц с поверхностью. Показано, что волновые возбуждения в пластине приводят к существенному динамическому изменению поверхностного отклика. Проанализировано распределение повреждений и пластической деформации, генерируемых в результате соударений, обнаружена корреляция этого распределения со структурой волны.

Влияние волновых возбуждений на процессы деформации и разрушения твердых тел при динамическом нагружении достаточно трудно исследовать экспериментальными средствами, что связано с динамическим характером процесса. В работе [1] численно моделировалась генерация волновых возбуждений при импульсном воздействии на металлические пластины разной толщины. Было показано, что в результате удара генерируется вихреподобный пакет скоростей, сохраняющий свою структуру при дальнейшем распространении. В тонких пластинах конфигурация смещений аналогична аналитическому решению в виде волны Лэмба, в толстых — волны Рэлея. Указывалось, что подобные динамические дефекты способны переносить упругую энергию на достаточно большие расстояния. Причем переносимая энергия может высвобождаться в местах, ослабленных присутствием дефектов, неоднородностей, приводя к генерации и накоплению повреждений даже в областях, удаленных от места удара.

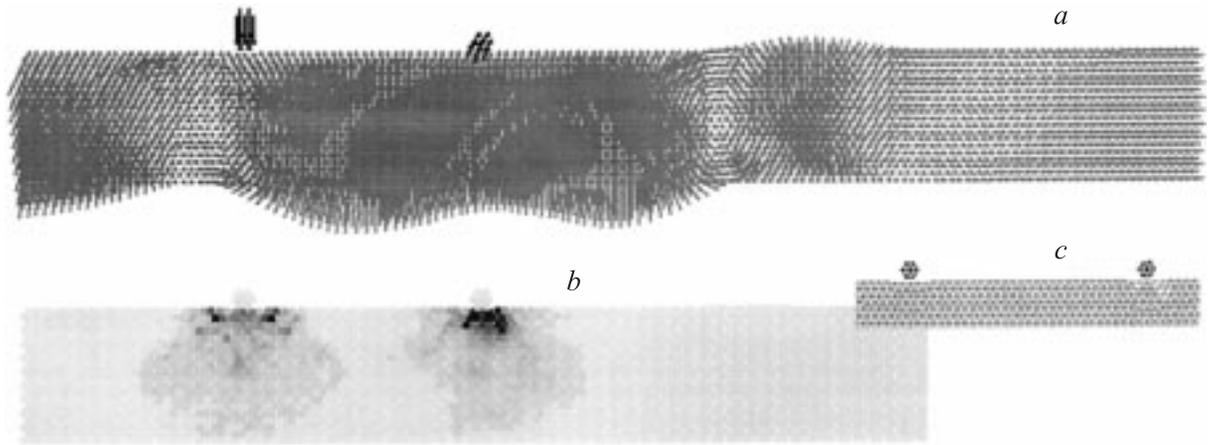
В данной работе поставлена задача проанализировать, какое влияние оказывает возбуждение поверхности, обусловленное распространением

поверхностных волн, на ее отклик при локальном ударном нагружении. Актуальность задачи обусловлена проблемой изучения возможных механизмов сверхглубокого проникания [2], а также формирования высокопрочных покрытий с высокой адгезией при холодном газодинамическом напылении [3]. Среди различных подходов к объяснению феномена сверхглубокого проникания можно выделить два основных. Первый из них основан на предположении о локальной потере сдвиговой прочности материала за счет адиабатического разогрева среды [4]. При этом предполагается, что возможен самоподдерживающийся режим обтекания частицы, материал в окрестности частицы описывается как вязкая жидкость. Во втором подходе акцент делается на локальное изменение механических свойств поверхности [5]. Предполагается локальное ослабление материала благодаря возникновению растягивающих напряжений, направленных вдоль поверхности.

Возможной причиной локального снижения прочности материала может быть сложное взаимодействие пакетов поверхностных волн, описанных в [1], друг с другом и с налетающими частицами. При этом хорошо известен экспериментально установленный эффект повышения адгезионной способности при увеличении плотности потока частиц, что говорит о важной роли коллективного фактора в данном процессе. Волновое возбуждение поверхности может быть актуально также и для многих других процессов, в частности для ультразвуковой обработки материалов. Кроме того, подобная поверхностная „механоактивация“ материала представляет интерес и с чисто научной точки зрения.

В настоящей работе рассматривалась задача группового соударения частиц с металлической пластиной. Физико-механические параметры материала как пластины, так и частиц соответствовали алюминию [6]. Моделирование осуществлялось методом подвижных клеточных автоматов (английская аббревиатура — МСА) [7–9].

Скорость налета частиц, направленная по нормали к поверхности, была выбрана равной  $\sim 200$  m/s, с тем чтобы энергия удара в случае налета на невозмущенную поверхность была достаточной для генерации пластических деформаций, но не приводила к повреждениям материала. Налетающие частицы были разнесены в пространстве и времени так, чтобы удар первой частицы генерировал поверхностную волну, а вторая частица налетала на уже возбужденную область поверхности примерно на  $17 \mu\text{s}$  позже. Зафиксировав, таким образом, время между событиями, варьировалось расстояние между частицами  $d$  и исследовалось, как

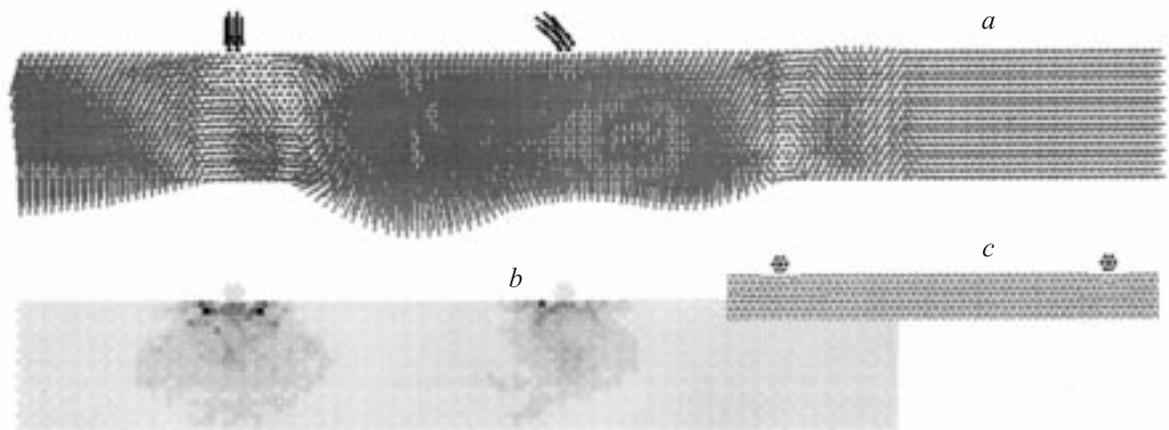


**Рис. 1.** Поле скоростей (*a*), распределение работы пластической деформации (*b*), структура межавтоматных связей (*c*) в результате удара двух частиц, разнесенных на  $d = 30 \text{ nm}$  к  $32.5 \mu\text{s}$  после налета первой частицы.

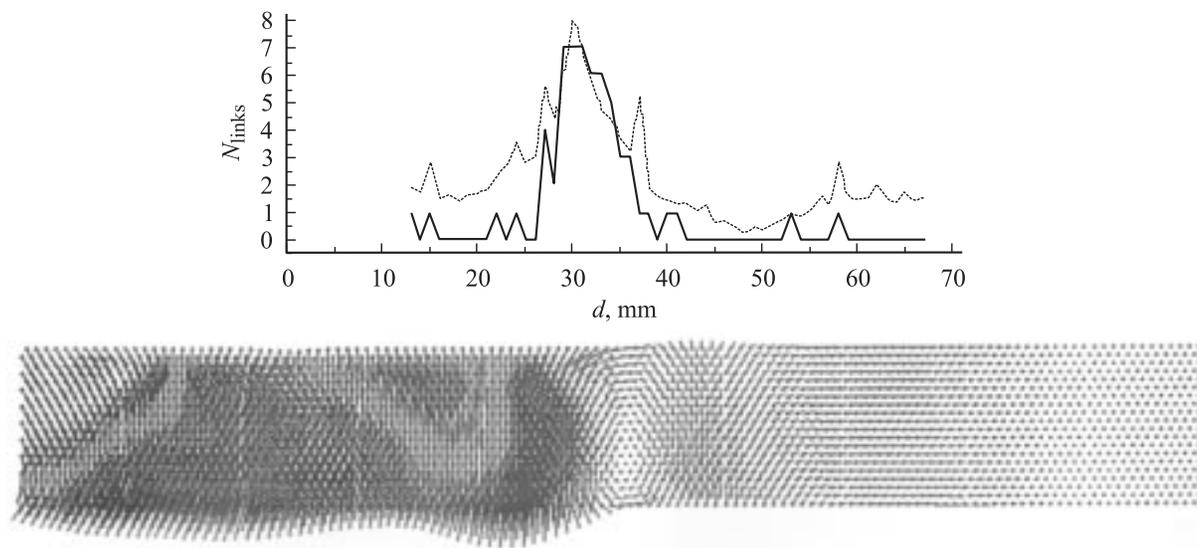
меняется взаимодействие второй частицы с поверхностью пластины в зависимости от взаимного положения распространяющейся волны и налетающей частицы.

Результаты моделирования показали, что налет второй частицы на пластину в присутствии упругой волны существенно отличается от соударения с невозбужденной поверхностью. Это говорит о том, что динамическое состояние поверхности может оказывать существенное влияние как на характер протекания процесса соударения, так и на его результаты. В частности, при некоторых расстояниях  $d$  второе соударение может приводить к генерации повреждений при той же скорости налета частицы.

На рис. 1 приведены поле скоростей, структура повреждений и распределение пластической работы после отскока обеих частиц для случая, при котором взаимное расположение второй частицы и волны обеспечивает максимум повреждений на поверхности пластины. Эта ситуация соответствует значению  $d = 30$  mm. Чтобы сравнивать „эффективность“ удара в зависимости от расстояния между частицами, необходимо сопоставлять величину необратимых изменений в поверхности материала. Первоначально для этой цели использовалась величина повреждений, т. е. количество разорванных межавтоматных связей. Однако эта характеристика неудобна, поскольку количество разорванных связей дискретно, причем с большим шагом изменения. Удобнее использовать удельную работу пластической деформации, которая интегральным образом отражает величину неупругих деформаций. Отскок первой частицы происходит строго по нормали к поверхности, через  $\sim 8.5 \mu\text{s}$  от момента касания. Для второй частицы распространяющаяся слева направо поверхностная волна искажает симметрию напряженного состояния и делает одно из направлений „выделенным“. Поэтому скорость второй частицы после отскока значительно отклоняется от направления нормали, при этом абсолютное значение скорости меньше, чем у первой частицы. Как отмечалось в [1], в результате столкновения в пластине формируется и распространяется вихреподобный пакет скоростей (рис. 1, *a*). В данной работе было установлено, что в результате второго соударения амплитуда скоростей в первичном вихре незначительно увеличивается. Если посмотреть на структуру волны в момент второго касания для  $d = 30$  mm, то можно заметить, что скорость второй частицы в точке касания совпадает с направлением



**Рис. 2.** Поле скоростей (*a*), распределение работы пластической деформации (*b*), структура межавтоматных связей (*c*) в результате удара двух частиц, разнесенных на  $d = 43 \text{ mm}$  к  $32.5 \mu\text{s}$  после налета первой частицы.



**Рис. 3.** Распределение повреждений (сплошная линия) и работы пластической деформации (штрихпунктир) в зависимости от положения точки удара относительно поверхностной волны.

„закрученности“ вихря, в результате соударения увеличивает энергию вихря.

Пониженная скорость отскока, а также возросшая величина неупругой деформации и большее количество повреждений свидетельствуют о более неупругом характере столкновения в случае возбужденной поверхности при данной конфигурации волны и налетающей частицы. В реальном эксперименте это может приводить к увеличению адгезионной способности.

На рис. 2 приведен случай другого расположения места соударения второй частицы ( $d = 43 \text{ mm}$ ). При этом налет второй частицы не приводит к повреждениям, а величина работы неупругой деформации существенно меньше. Скорость отскока также направлена под углом к нормали, а ее абсолютное значение имеет большую величину, чем скорость отскока первой частицы. Соответственно амплитуды скоростей в исходном вихревом пакете после второго соударения меньше, чем в предыдущем случае. Аналогично можно ожидать уменьшение адгезионной способности.

Таким образом, присутствие поверхностной волны в пластине приводит не к усилению или ослаблению соударения частицы с преградой, а к динамическому перераспределению механического отклика системы пластина–частица. Для изучения закономерностей этого перераспределения построим зависимости величин, характеризующих различные варианты столкновения от расстояния между частицами, и сопоставим их с конфигурацией поверхностной волны. Результаты представлены на рис. 3, где видно, что две используемые характеристики — величина повреждений и пластическая работа — достаточно хорошо коррелируют как друг с другом, так и с распределением скоростей в волне — максимум повреждений расположен вблизи вихревой структуры в поле скоростей.

Анализ распределения деформаций в пластине показал, что благодаря поверхностной волне в пластине существует область растягивающих напряжений, направленных вдоль поверхности. Эта область распространяется слева направо вместе с волной, а максимум повреждений приходится на ее центральную часть. Следует отметить, что данный результат частично совпадает с [5], где основным фактором в механизме сверхглубокого проникания полагается наличие растягивающих напряжений, однако в [5] возникновение растяжений объясняется выпуклостью распределения потока частиц.

Таким образом, присутствие волновых возбуждений существенно меняет характер взаимодействия частиц и обрабатываемой поверхности, что определяется взаимным положением налетающей частицы и поверхностной волны. Поверхностная волна приводит к динамическому перераспределению ряда свойств поверхности, таких как прочность, пластичность, адгезионная способность. Описанный механизм активации поверхности может играть очень важную роль в ряде технологических процессов, в частности ультразвуковой обработки материалов, газодинамического или детонационного напыления.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ („Научная школа академика В.Е. Панина“ N НШ–2324.2003.1), а также гранта Министерства образования РФ и CRDF в рамках программы BRNE (проект N 016–02).

## Список литературы

- [1] Чертов М.А., Смолин А.Ю., Шилько Е.В. и др. // Физ. мезомех. 2004. Т. 7. № 2.
- [2] Козорезов К.И., Максименко В.Н., Ушеренко С.М. // Избранные проблемы современной механики. Ч. 1. 1981. № 9. С. 115.
- [3] Солоненко О.П., Алхимов А.П., Марусин В.В. и др. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. Новосибирск: Наука. Сибирская изд. фирма РАН, 2000. 425 с. (Низкотемпературная плазма. Т. 18). Гл. 6.
- [4] Kiselev S.P., Kiselev V.P. // International Journal of Impact Engineering. 2002. V. 27. P. 135–152.
- [5] Rakhimov A.E. // News of Moscow University, Mechanics and Mathematics. 1994. N 5. P. 72–74 (in Russian).
- [6] Физические величины: Справочник / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [7] Psakhie S.G., Horie Y., Ostermeyer G. et al. // Theor. and Appl. Fract. Mech. 2001. V. 37. P. 311–334.
- [8] Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Шилько Е.В. и др. // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 9. С. 34–37.
- [9] Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Татаринцев Е.М. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 2. С. 13–18.