

УДК 519.6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ (МНОГОПРОЦЕССОРНОЕ) ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ПОКРЫТИЯ НА РАЗВИТИЕ СДВИГОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В МЕТАЛЛАХ

С. М. Бахрах, Н. А. Володина, О. Б. Дреннов, Т. А. Горева,  
А. Л. Михайлов, П. Н. Низовцев, Е. В. Шувалова  
(РФЯЦ—ВНИИЭФ)

Приведены результаты численного моделирования влияния покрытия на границе раздела сред на процесс развития сдвиговой неустойчивости при косом соударении металлических пластин. Состояние материалов описывалось в упругопластическом приближении. Исследовалась зависимость амплитуды возмущения от толщины покрытия и его свойств. Расчеты проводились на многопроцессорной вычислительной системе с распределенной памятью.

### Введение

Косое соударение металлических слоев при выполнении определенных условий по величинам угла соударения  $\gamma$  и скорости перемещения точки контакта  $v_k$  сопровождается волнообразованием на поверхности раздела: на контактной границе развивается неустойчивость Кельвина—Гельмгольца [1, 2].

Исследование неустойчивости Кельвина—Гельмгольца, проявляющейся в виде развития возмущений на границе раздела веществ при наличии разрыва тангенциальной составляющей скорости, представляет как научный, так и практический, прикладной, интерес. В частности, данный процесс реализуется в режиме сварки взрывом [3]. Особенностью сварки взрывом является образование прочного соединения металлов под действием высокого давления (без внешнего нагрева) благодаря локальному разогреву соприкасающихся материалов вследствие интенсивного пластического течения в зоне шва. Обязательным условием получения прочного соединения при сварке в твердой фазе является развитие интенсивных пластических деформаций материалов в зоне шва, обеспечивающих создание физического контакта и активизацию поверхностных слоев. Интерес представляет тот факт, что возможно сварное соединение одинаковых материалов. Традиционно сварка взрывом осуществляется

путем косоугольного соударения свариваемых слоев в условиях дозвукового режима соударения, когда скорость точки контакта меньше скорости звука в материале. В таких условиях в точке контакта формируется кумулятивная струя или облако частиц.

Следует отметить, что процесс неустойчивости Кельвина—Гельмгольца, аналогичный реализуемому при сварке взрывом, может оказывать негативное влияние на работу различных систем. Поэтому были выполнены экспериментальные исследования по поиску путей подавления неустойчивости с помощью нанесения на поверхность слоев специального покрытия [4].

### Экспериментальное исследование

Влияние покрытия на развитие возмущений исследовалось в серии экспериментов по косому соударению плоских металлических пластин. Использовалась экспериментальная установка, в которой пластина металась скользящей детонационной волной (рис. 1).

Неподвижная пластина (4) размещалась на прочном основании (5). Над ней устанавливалась метаемая пластина (2). Обе пластины были выполнены из алюминиевого сплава АМЦ, имели одинаковую толщину  $\Delta = 4$  мм. На поверхности метаемой пластины (2) размещался слой пластического ВВ (1) на основе мелкодисперсного ТЭНа, в котором возбуждалась скользя-

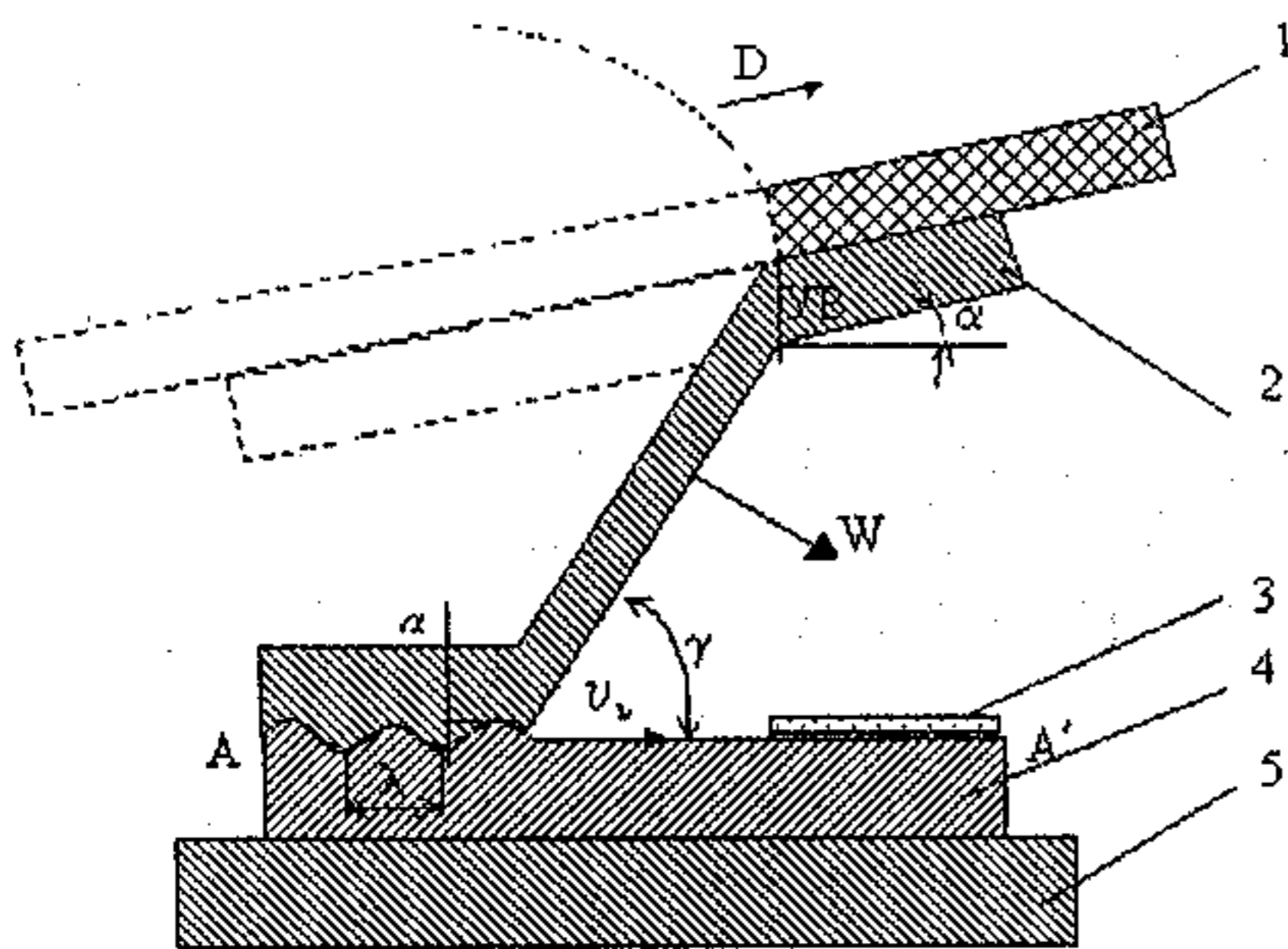


Рис. 1. Схема проведения опытов

щая детонационная волна. На поверхность неподвижной пластины (плоскость AA' на рис. 1) наносился слой металлического покрытия (3). Для нанесения покрытия был применен метод электронно-лучевого напыления в вакууме.

Впервые способность тонких слоев металлического покрытия ( $\Delta \approx 20$  мкм) подавлять развитие возмущений при косом соударении металлических пластин была описана в работе [4]. В настоящей работе исследуется влияние на процесс развития возмущений слоев покрытий, выполненных из того же материала (в данном случае алюминиевого сплава АМЦ) толщиной  $8 \text{ мкм} \leq \Delta \leq 31 \text{ мкм}$ . Такая постановка экспериментов, в которой совпадают как материалы соударяемых пластин, так и материал покрытия, продиктована стремлением максимального упрощения ситуации с целью построения физико-математической модели данного явления. Формально использование пластин и покрытия из одного материала предполагает исключение влияния различия плотности, прочности, температуры плавления и ряда других физических параметров материалов на процесс подавления возмущений.

Из образцов, испытавших динамическое нагружение, подготавливались микрошлифы, по которым проводился металлографический анализ контактной зоны. Режим нагружения ( $v_k = 4 \text{ км/с}$ ,  $\gamma = 12^\circ$ , давление нагружения в окрестности точки контакта  $P = 6,5 \text{ ГПа}$ ) соответствовал развитию в контрольных опытах волнообразных возмущений с амплитудой  $\alpha \approx 440 \text{ мкм}$  и длиной волны возмущения  $\lambda \approx 500 \text{ мкм}$  (рис. 2).

Получено, что алюминиевое покрытие приво-



Рис. 2. Фото микрошлифа

дит к устранению возмущений на контактной границе алюминиевых образцов (сплав АМЦ). Амплитуда возмущений уменьшается в 3–10 раз.

На пластине изначально присутствуют возмущения  $\Delta \sim 10 \text{ мкм}$ , обусловленные шероховатостью, присущей обработке (шлифованию) пластин. Результаты экспериментов представлены в табл. 1 и на рис. 3.



Рис. 3. Результаты экспериментов: а —  $\Delta = 8 \text{ мкм}$ ,  $\alpha = 120 \text{ мкм}$ ; б —  $\Delta = 22 \text{ мкм}$ ,  $\alpha = 40 \text{ мкм}$ ; в —  $\Delta = 31 \text{ мкм}$ ,  $\alpha = 10 \text{ мкм}$

Таблица 1  
Результаты экспериментального исследования

Толщина покрытия, мкм	Амплитуда возмущений, мкм
8	120
22	40
31	10

В данной серии экспериментов так же, как и в [1, 2], обнаружена избирательность в росте возмущений определенной длины волны. Из всего набора возмущений, присутствующих на поверхности образца в результате полировки, растут только возмущения с длиной волны  $\lambda = 0,5$  мм. Именно они зафиксированы на поверхности в сохраняемых образцах.

### Численное моделирование

**Начальная постановка.** Численное моделирование проводилось с использованием методики [5]. Это конечноразностная методика, использующая регулярную счетную сетку и метод концентраций для описания сильнодеформирующихся контактных границ. Учет прочностных свойств проводился по методу [6]. Для корректного описания процесса соударения и роста возмущений потребовалась подробная счетная сетка (характерный размер счетной ячейки  $\sim 0,003$  мм), что вынудило использовать счетную сетку с числом ячеек  $\sim 4 \cdot 10^6$ . В связи с этим расчеты проводились на вычислительных многопроцессорных системах с распределенной памятью по комплексу программ ЛЭГАК [7].

Моделировалось соударение двух алюминиевых пластин под углом 12 градусов. Начальная геометрия задачи приведена на рис. 4, где:

область 1 — налетающая пластина толщиной 0,4 см, начальная скорость  $U_0 = 0,9$  км/с;

область 2 — неподвижная пластина толщиной 1,5 см, на поверхности которой задавалось синусоидальное возмущение  $a = a_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda_0} x$  с длиной волны  $\lambda_0 = 0,5$  мм и амплитудой  $a_0 = 0,01$  мм (что соответствует шероховатости при обработке поверхности пластины);

область 3 — покрытие, которое наносилось на нижнюю пластину (толщина покрытия 0,01; 0,022 и 0,031 мм);

область 4 — вакуум, в который погружалась вся система.

Давление определялось по уравнению состоя-

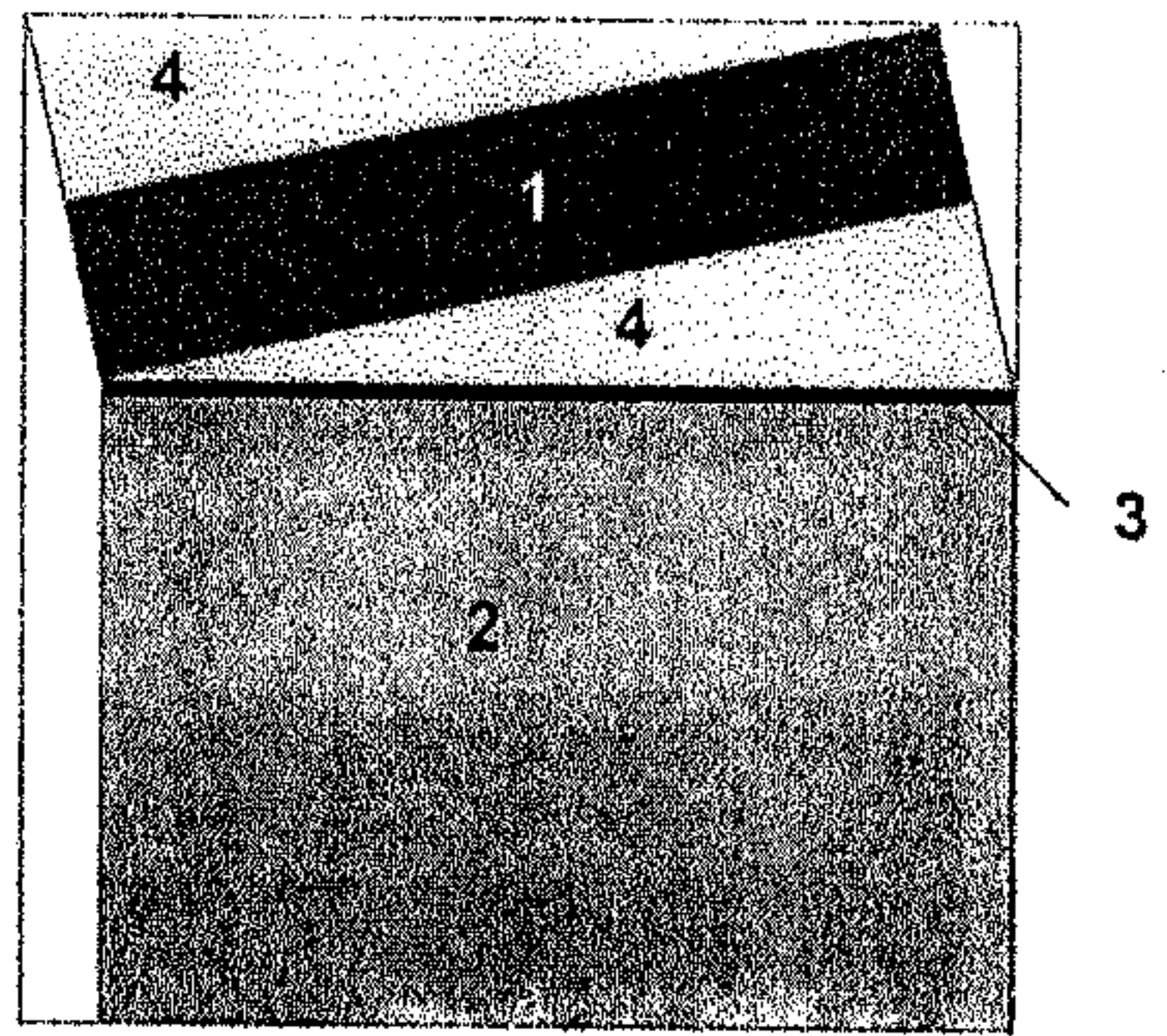


Рис. 4. Начальная геометрия

ния Ми-Грюнаизена, со следующими параметрами:  $\rho_0 = \rho_{00} = 2,64$  г/см<sup>3</sup>;  $c_0 = 5,55$  км/с;  $n = 3,2$ ;  $\Gamma = 2,14$ .

Параметры упругопластичности задавались следующие:  $\nu = 0,33$  — коэффициент Пуассона;  $Y_0 = 0,3$  ГПа — предел текучести.

Все расчеты проводились на эйлеровой (неподвижной) сетке. Счетная сетка бралась таким образом, чтобы на длину волны приходилось порядка 20 счетных ячеек. На толщину самого малого покрытия (0,01 мм) приходилось около трех счетных точек.

**Результаты расчетов.** Было проведено несколько серий расчетов:

- 1) соударения пластин без покрытия;
- 2) соударения пластин с покрытиями различной толщины;
- 3) соударения пластин с покрытиями различной толщины с начальной пористостью ( $\rho_0 = 2,4 \approx 0,9\rho_{00}$ ).

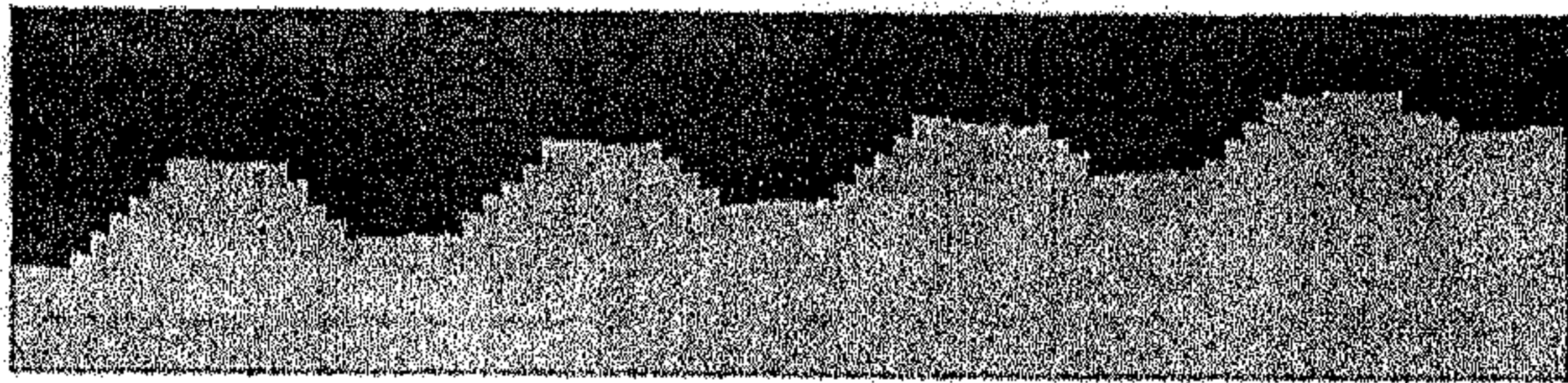
Результаты всех расчетов с начальной амплитудой  $a_0 = 0,01$  мм приведены в табл. 2.

Остановимся подробнее на каждой серии расчетов.

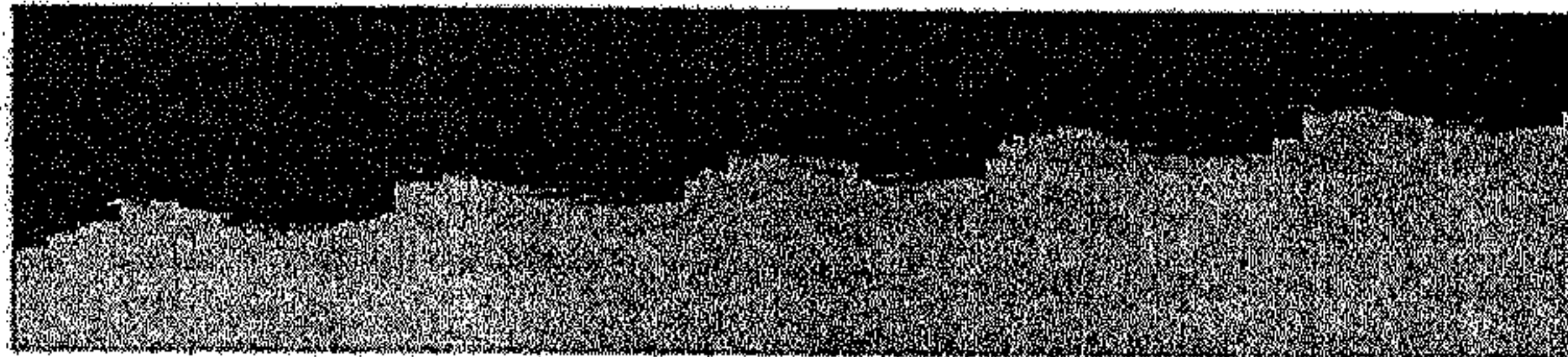
**Расчет без покрытия.** Сначала был проведен расчет соударения двух алюминиевых пластин без слоя покрытия.

Картина роста возмущений представлена на рис. 5,а. Хорошо видно, что возмущения растут и развиваются. Амплитуда возросла примерно в 34 раза по сравнению с первоначальной (см. табл. 2, расчет 1).

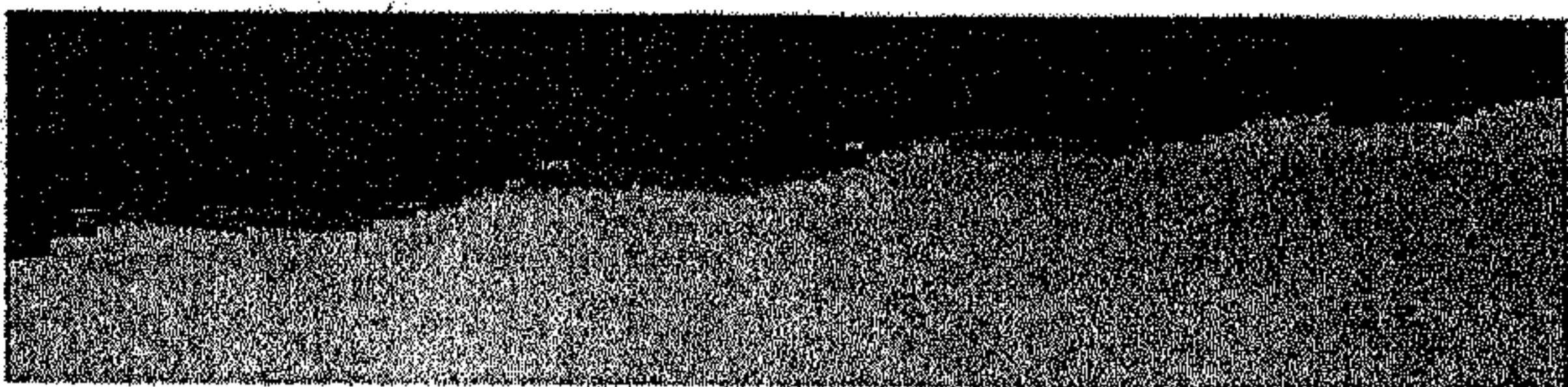
На рис. 6,а приведено поле тепловой энергии.



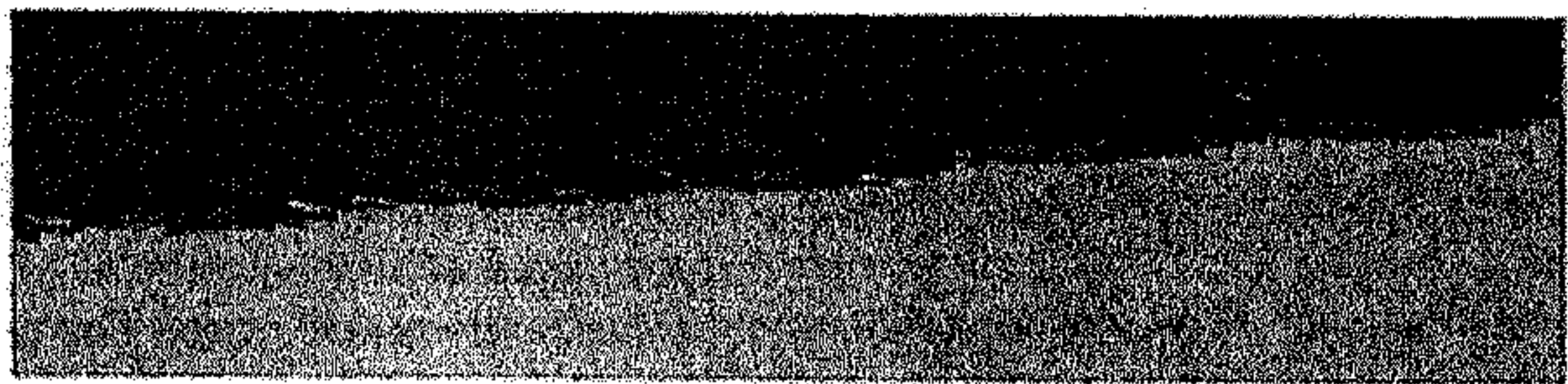
*a*



*б*



*в*



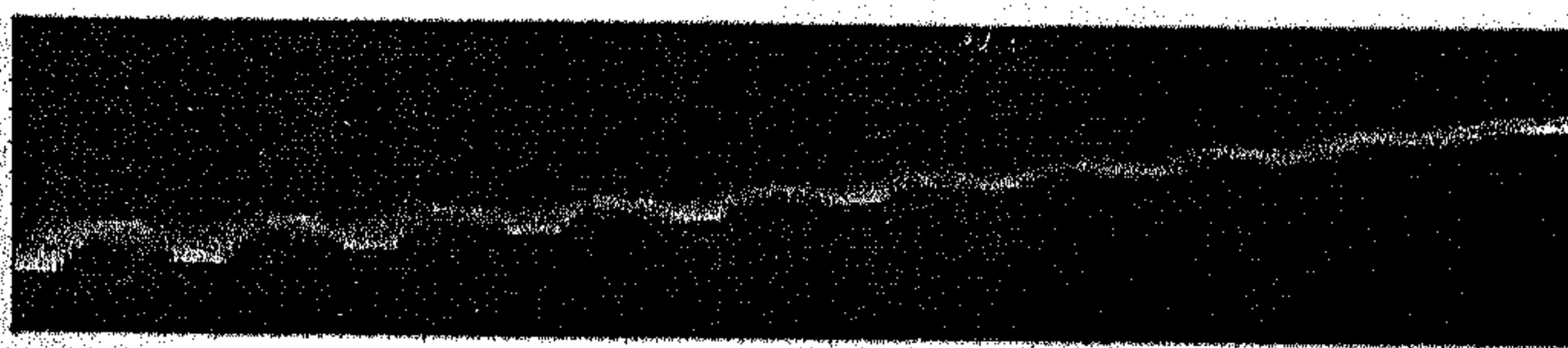
*г*



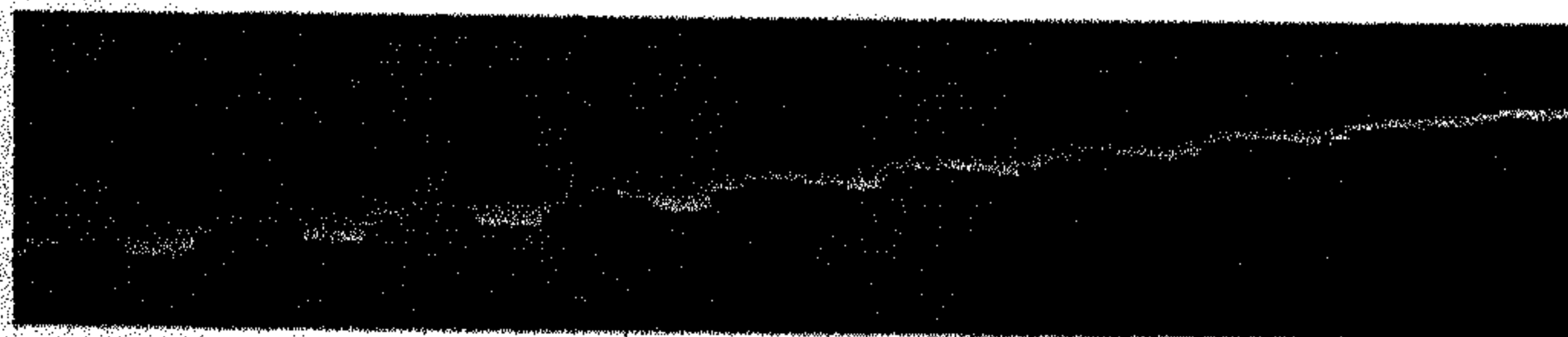
*д*

Рис. 5. Геометрия веществ в расчетных задачах,  $t = 0,3$ : *a* — без покрытия; *б* — с покрытием 0,01 мм; *в* — с покрытием 0,022 мм; *г* — с покрытием 0,031 мм; *д* — с покрытием 0,022 мм, в упругопластическом приближении

*Расчеты с покрытиями.* Чтобы выяснить влияние покрытия на рост возмущений была проведена серия расчетов с покрытиями следующей толщины: 0,01; 0,022; 0,031 мм. Матери-



*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 6. Поле тепловой энергии в расчетных задачах,  $t = 0,3$ : *a* — без покрытия; *б* — с покрытием 0,01 мм; *в* — с покрытием 0,022 мм; *г* — с покрытием 0,031 мм

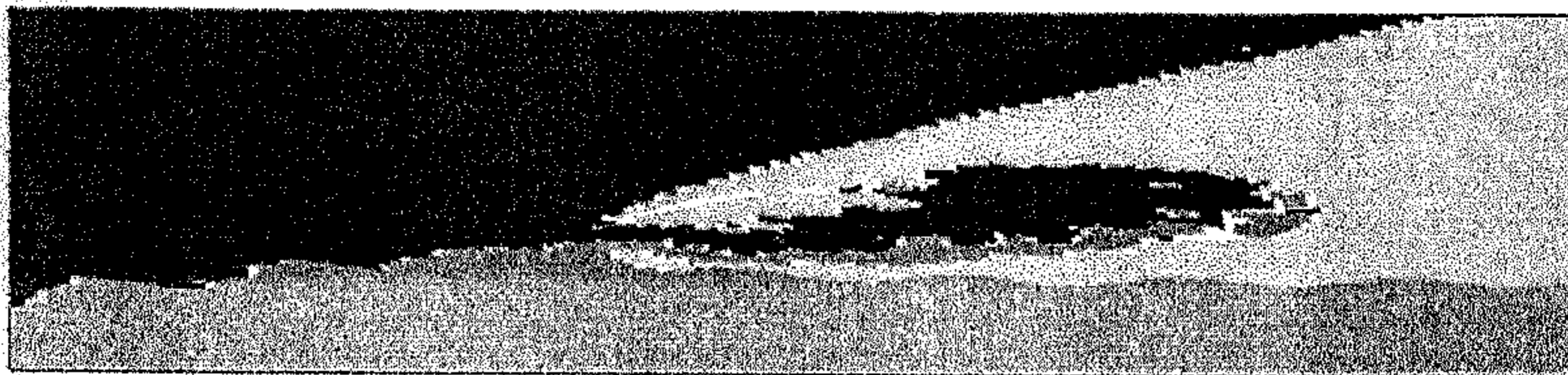
ал покрытия, как и пластин, — алюминий, однако покрытие рассчитывалось в газодинамическом приближении.

Картина роста возмущений для всех трех толщин покрытий представлена на рис. 5,б–г. Относительное увеличение амплитуды приведено в табл. 2, расчеты 2–4.

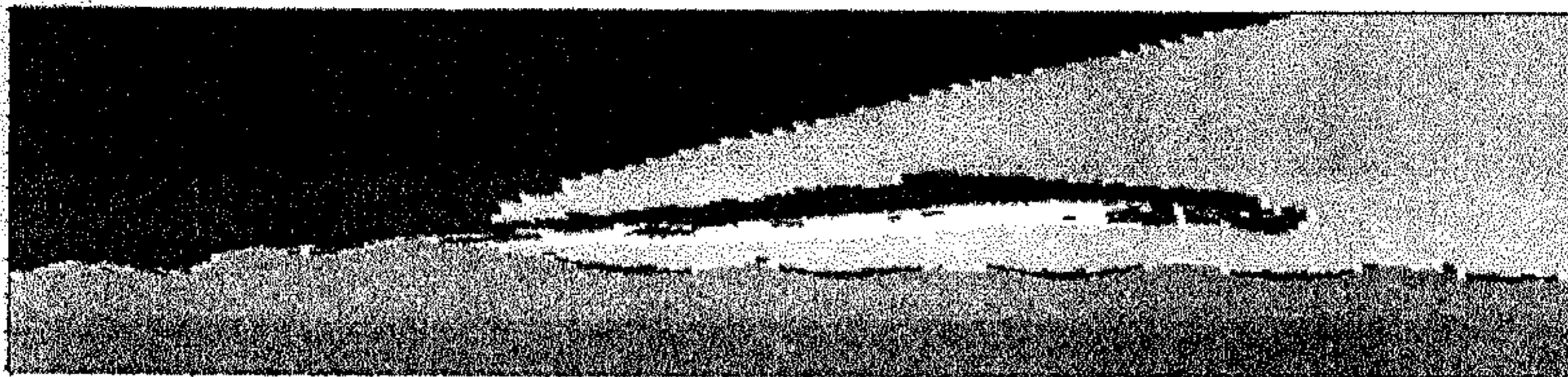
Из рисунков и таблицы видно, что если на нижнюю пластину нанесено самое толстое покрытие в 0,031 мм, то рост возмущений отсутствует. При уменьшении толщины покрытия начинается рост возмущений. Так, при толщине

покрытия 0,01 мм возмущения возросли в 23 раза по сравнению с первоначальными, что всего в 1,5 раза меньше, чем при соударении без покрытий.

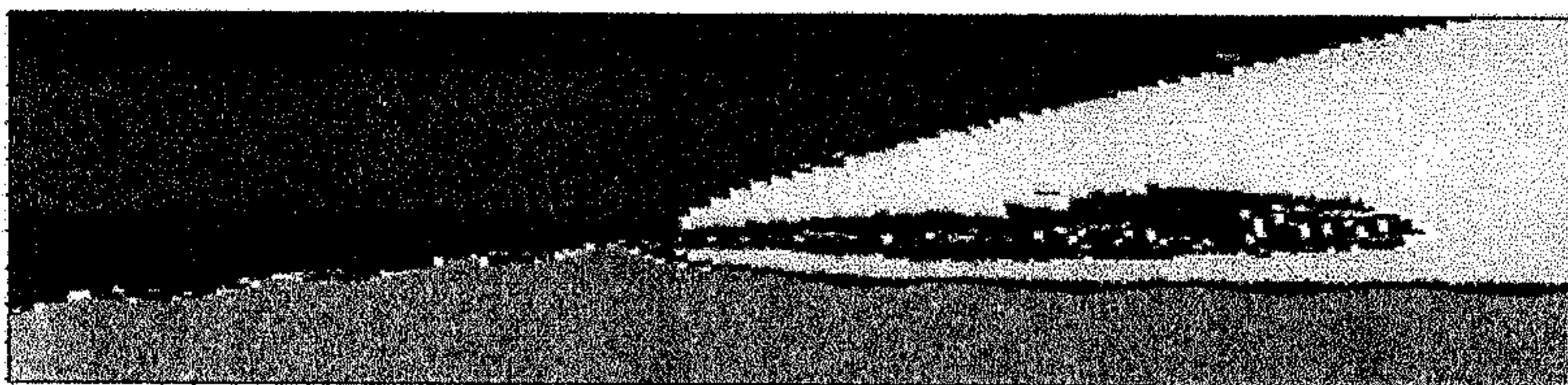
На рис. 6,б–г приведено поле тепловой энергии. Как видно, при увеличении толщины покрытия наблюдается снижение уровня разогрева и уменьшение ширины его зоны, что свидетельствует о локализации деформации. При увеличении толщины покрытия увеличивается вклад материала покрытия в кумулятивную струю, которая образуется в точке контакта (рис. 7).



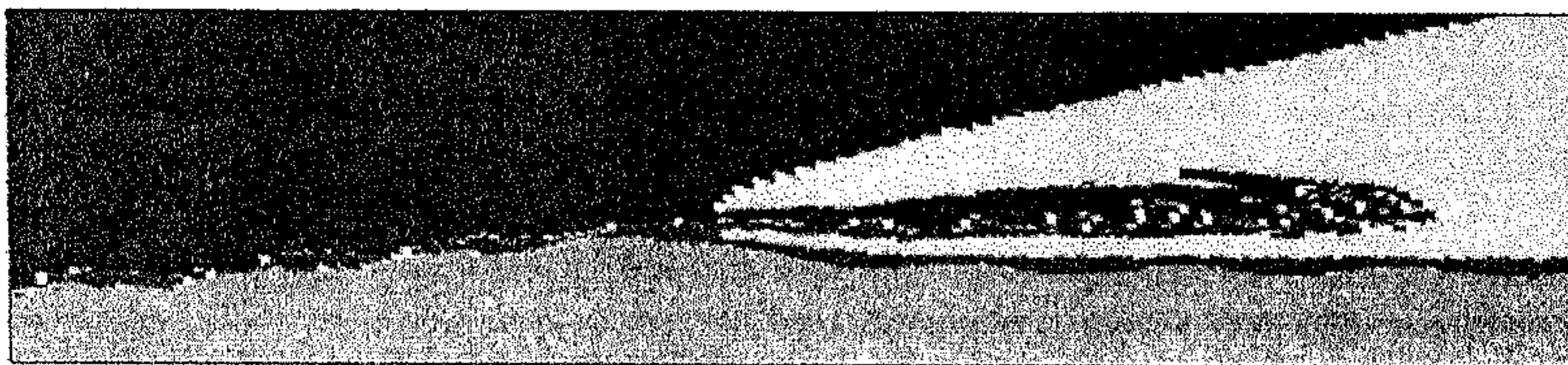
a



b



в



г

Рис. 7. Часть геометрии веществ, струя,  $t = 0,2$ : а — без покрытия; б — с покрытием 0,01 мм; в — с покрытием 0,022 мм; г — с покрытием 0,031 мм

*Расчеты с пористыми покрытиями.* Ввиду неопределенности параметров состояния вещества покрытия были проведены расчеты с варьированием степени пористости вещества покры-

тия. Расчеты проведены для всех трех толщин покрытий с начальной плотностью вещества покрытия  $\rho_0 = 2,4 \approx 0,9\rho_{00}$ . Для покрытия также использовалось газодинамическое приближение

Таблица 2  
 Результаты расчетов: коэффициенты роста амплитуды

Номер расчета	Вид расчета	$a/a_0$
1	Без покрытия	34
2	С покрытием 0,01 мм, в газодинамическом приближении	23
3	С покрытием 0,022 мм, в газодинамическом приближении	3,5
4	С покрытием 0,031 мм, в газодинамическом приближении	0,8
5	С пористым покрытием 0,01 мм ( $\rho_0 = 2, 4$ ), в газодинамическом приближении	25
6	С пористым покрытием 0,022 мм ( $\rho_0 = 2, 4$ ), в газодинамическом приближении	5,4
7	С пористым покрытием 0,031 мм ( $\rho_0 = 2, 4$ ), в газодинамическом приближении	2,5
8	С покрытием 0,022 мм, в упругопластическом приближении	1,2

вещества. Для пластин использовалась упруго-пластическая модель с постоянным пределом текучести.

Коэффициенты увеличения амплитуды приведены в табл. 2, расчеты 5—7.

Результаты расчетов показали, что пористые покрытия приводят к небольшому росту возмущений по сравнению с непористыми. При этом чем толще покрытие, тем заметнее влияние пористости на рост возмущения. Возможно, это связано с тем, что при использовании модели пористого вещества, в которой до достижения кристаллической плотности сжатие покрытия не сопровождается ростом противодавления, увеличение пористости эквивалентно снижению эффективной толщины покрытия.

*Расчет с учетом сдвиговой прочности покрытия.* Для проверки корректности расчетов с точки зрения описания в эйлеровой многокомпонентной постановке для варианта покрытия толщиной 0,022 мм был проведен расчет, в котором прочность покрытия соответствовала прочности пластин. Практически расчет показал отсутствие возмущений на контактной поверхности.

Форма контактной границы для данного расчета приведена на рис. 5, д. Из рисунка и табл. 2,

расчет 8, видно, что роста возмущений не наблюдается.

### Обсуждение результатов экспериментального и численного исследования

Результаты экспериментов и численного моделирования показали, что при определенном выборе параметров (материала и толщины) покрытия удается практически полностью исключить развитие сдвиговой неустойчивости при соударении металлических пластин. Следует отметить согласие результатов экспериментального и численного исследования данного явления.

На сегодняшний день отсутствует строгое обоснование реализуемых при этом физических процессов и могут быть высказаны некоторые предположения о влиянии покрытия на процесс неустойчивости Кельвина—Гельмгольца при косом соударении металлических пластин. Подавление неустойчивости с помощью металлического покрытия, выполненного путем напыления порошка, можно объяснить следующим. В зоне контакта реализуется нагружение криволинейной ударной волной, сопровождающееся интенсивными сдвиговыми течениями и разогревом, приводящим к разупрочнению вещества. Взаимодействие струи с приграничными слоями материалов соударяющихся пластин приводит к реализации тангенциального разрыва скоростей и соответственно к развитию возмущений на контактной границе. Отметим, что процесс интенсивного деформирования и сильного разогрева происходит в локальной области  $\sim 50$  мкм (см. рис. 5). При наличии покрытия его вещество вовлекается в интенсивное течение, а вклад со стороны пластин уменьшается (см. рис. 6). При этом по причине низкой прочности покрытия снижается разогрев вещества в контактной зоне. В результате происходит локализация деформации. Прочность состава, полученного при напылении, низка, и соответственно низок уровень сцепления с поверхностью пластин, что замедляет рост сдвиговой неустойчивости на поверхности пластин.

Естественно, высказанные соображения о механизме стабилизирующего действия покрытий на рост возмущений нуждаются в дополнительной проверке и уточнении.

## Заключение

Проведено экспериментальное и численное исследование стабилизирующего действия покрытия на развитие сдвиговой неустойчивости при косом соударении металлических пластин. Получено согласие результатов экспериментального и численного моделирования. Для объяснения стабилизирующего действия покрытия, выполненного из того же материала (алюминий), что и соударяющиеся пластины, высказано предположение о локализации (сужении) зоны интенсивных пластических деформаций.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 02-01-00796).

## Список литературы

1. Дреннов О. Б., Михайлов А. Л., Низовцев П. Н., Раевский В. А. Развитие возмущений на границе раздела металлов при косом соударении со сверхзвуковой скоростью перемещения точки контакта // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2001. Вып. 1. С. 34—42.
2. Бахрах С. М., Володина Н. А., Низовцев П. Н., Спиридонов В. Ф., Шувалова Е. В. Численное моделирование роста

начальных возмущений при косом соударении металлических пластин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 4. С. 30—34.

3. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972.
4. Дреннов О. Б., Михайлов А. Л., Осипов Р. С., Родигина Л. Д. Стабилизация волнообразования на контактной границе слоев металлов в режиме сварки взрывом // ФГВ. 1989. № 5. С. 93—98.
5. Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф., Шанин А. А. Метод расчета газодинамических течений неоднородной среды в лагранжево-эйлеровых координатах // Докл. АН СССР. 1984. Т. 278. Вып. 4. С. 829—833.
6. Бахрах С. М., Ковалев Н. П., Павлуша И. Н. Метод расчета упругопластических течений. // Тр. Всес. конф. по числ. методам теории упругости и пластичности. Ч. I. Новосибирск: Наука, 1974. С. 22—36.
7. Авдеев П. А., Артамонов М. В., Бахрах С. М. и др. Комплекс программ ЛЭ-ГЭК и принципы его распараллеливания на многопроцессорных ЭВМ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 3. С. 14—18.