

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ III.20. МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФИЗИКА И МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ, МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ И НАНОМАТЕРИАЛОВ, ТРИБОЛОГИЯ

Программа III.20.1. Физическая мезомеханика, физика прочности и неравновесная термодинамика твердых тел как многоуровневых систем и проблемы создания на их основе новых материалов, включая наноструктурные (координатор акад. В. Е. Панин)

В Институте физики прочности и материаловедения теоретически и экспериментально обоснована концепция многоуровневого описания деформируемого твердого тела как нелинейной иерархически организованной системы. Поверхностные слои и все внутренние границы раздела рассматриваются как самостоятельная двумерная функциональная подсистема с ближним порядком. Каналированное пластическое течение в двумерной подсистеме

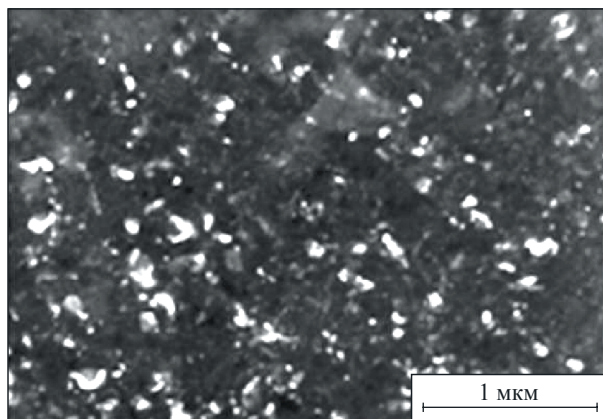


Рис. 42. Образование наноструктуры в аустенитной стали диспергированием цепочки $\gamma \rightarrow \alpha' \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha'$ структурно-фазовых превращений.

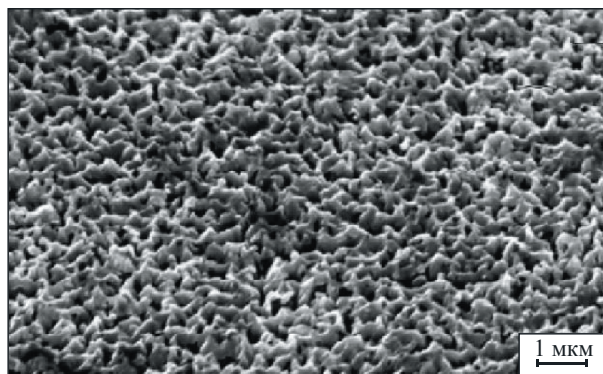


Рис. 43. Наноструктурированный интерфейс в многослойном теплозащитном покрытии.

обуславливает образование и эмиссию в кристаллическую подсистему всех типов деформационных дефектов. Данный многоуровневый процесс развивается по схеме нелинейных волн каналированной пластической деформации, которые определяют закон самосогласования пластического течения в иерархически организованных системах. Диспергирование нелинейных волн структурно-фазовых превращений в условиях интенсивных пластических деформаций обуславливает формирование нанокристаллической структуры с многоугловыми разориентировками (рис. 42). На основе новой концепции разработаны теплозащитные многослойные наноструктурированные покрытия для работы в высокоэнергетических плазменных потоках (рис. 43).

Развиваемые представления об автоволновом характере развития пластической деформации твердых тел распространены на горные породы. На примере образцов из силвинита, мрамора и песчаника показано, что пластическая деформация в горных породах протекает локализованно в форме автоволнового процесса (рис. 44). При этом длина автоволны в таких материалах ~ 5 мм, а скорость распространения автоволны, определяемая по наклону графика (рис. 45), составляет $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ м/с, что близко к значениям, характерным для металлов и сплавов. Подобная скорость распространения близка к значениям, характерным для так называемых медленных движений в земной коре, возникающих после землетрясений и горных ударов. Таким образом, полученный результат может рассматриваться как наблюдение «медленных движений» в лабораторных условиях.

Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и оптической интерференционной профилометрии исследованы закономерности гофрирования системы тонкая наноструктурная пленка (наклеенная фольга)—подложка при

термическом воздействии. Исследования проведены на примере модельной композиции, состоящей из пленки Al, подслоя полистирола (PS) и подложки Si. Показано, что в условиях сжатия на границе раздела пленка—подслой формируется периодическое распределение напряжений и деформаций, приводящее к возникновению волнистости. В вершинах складок напряжения, нормальные к границе раздела, являются растягивающими, а в областях впадин — сжимающими. Аналогично изменяются и напряжения в плоскости пленки вблизи ее свободной поверхности. Выделено три стадии эволюции гофра в условиях периодического распределения напряжений. На начальном этапе гофрирования релаксация нормальных напряжений способствует увеличению высоты складок, в то время как их длина волны практически не изменяется. Последнее, однако, обуславливает постепенный рост локальной кривизны пленки в областях вершин и впадин гофра и соответствующее увеличение компоненты напряжений в плоскости пленки. Релаксация касательных напряжений, которая начинается на второй стадии, вызывает увеличение длины волны складок, сопровождающееся слабым ростом их высоты. В результате после отжига в течение 30 ч происходят прекращение роста складок и стабилизация гофра. В процессе эволюции гофра наблюдается его локальное упорядочение. Оно выражается в трансформации лабиринтной системы складок в зигзагообразную, которая характеризуется наличием прямолинейных сегментов складок, параллель-

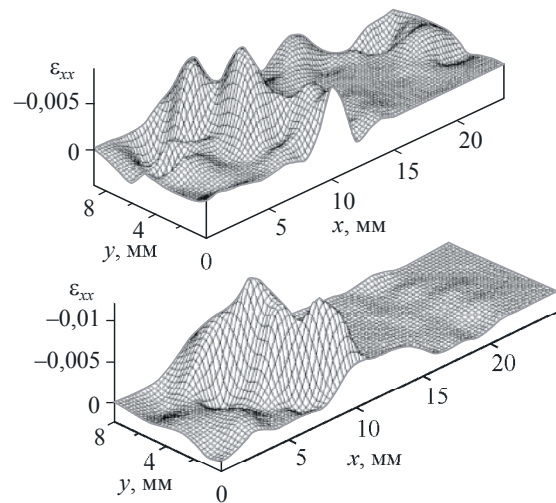


Рис. 44. Распределение деформаций для двух моментов времени

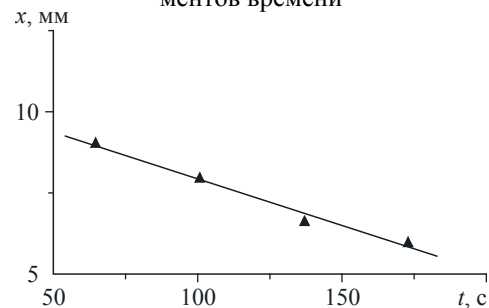


Рис. 45. Скорость движения фронта

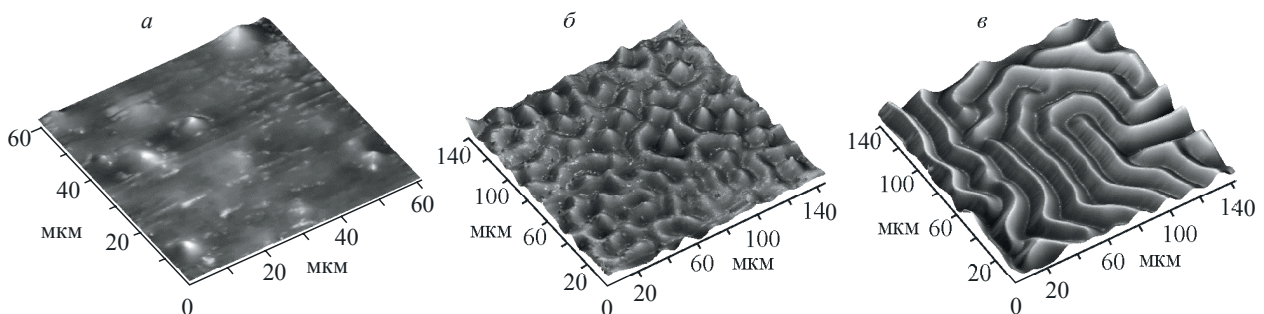


Рис. 46. АСМ-изображения деформационного рельефа на поверхности пленок Al после отжига при температуре 110 °С в течение 1,5 мин (а), 3 мин (б) и 40 ч (в).

ных друг другу (рис. 46). Выявленные закономерности положены в основу создаваемого датчика состояния, основанного на изменении рельефа поверхности чувствительного элемента — напыленной (наклеенной) тонкой пленки.

Программа Ш.20.2. Научные основы создания материалов и покрытий с неравновесными структурно-фазовыми состояниями на основе многоуровневого подхода (координатор член-корр. РАН С. Г. Псахье)

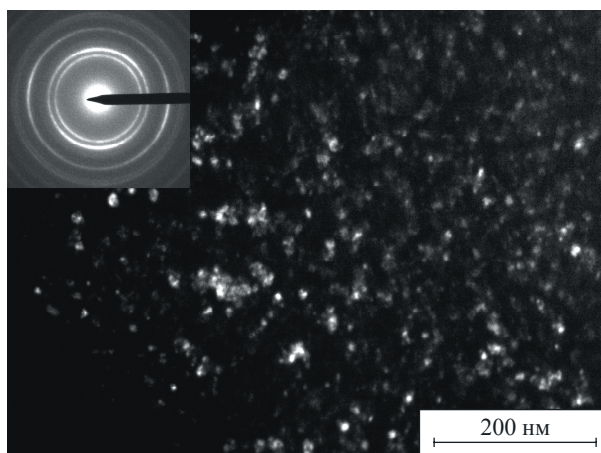


Рис. 47. Темнопольное изображение микроструктуры многокомпонентного покрытия после отжига при $T = (800 \div 900) \text{ } ^\circ\text{C}$.

В Институте физики прочности и материаловедения показано, что с увеличением концентрации легирующих элементов (Al, Si, Cr, Ni, Cu) происходит изменение механизма зарождения и роста покрытий на основе TiN от эпитаксиального и столбчатого с формированием двухуровневой микроструктуры к непрерывному динамическому зарождению островков роста с развитием нанокompозитных состояний с размерами нанокристаллов менее 20 нм (рис. 47). В покрытиях всех изученных составов обнаружены высокая упругопластическая кривизна кристаллической решетки в многоуровневой структуре с размером зерна до 500 нм и широкий спектр значений упругой кривизны кристалла от нулевых до 200 град/мкм в индивидуальных нанокристаллах размерами до (10 ÷ 15) нм.

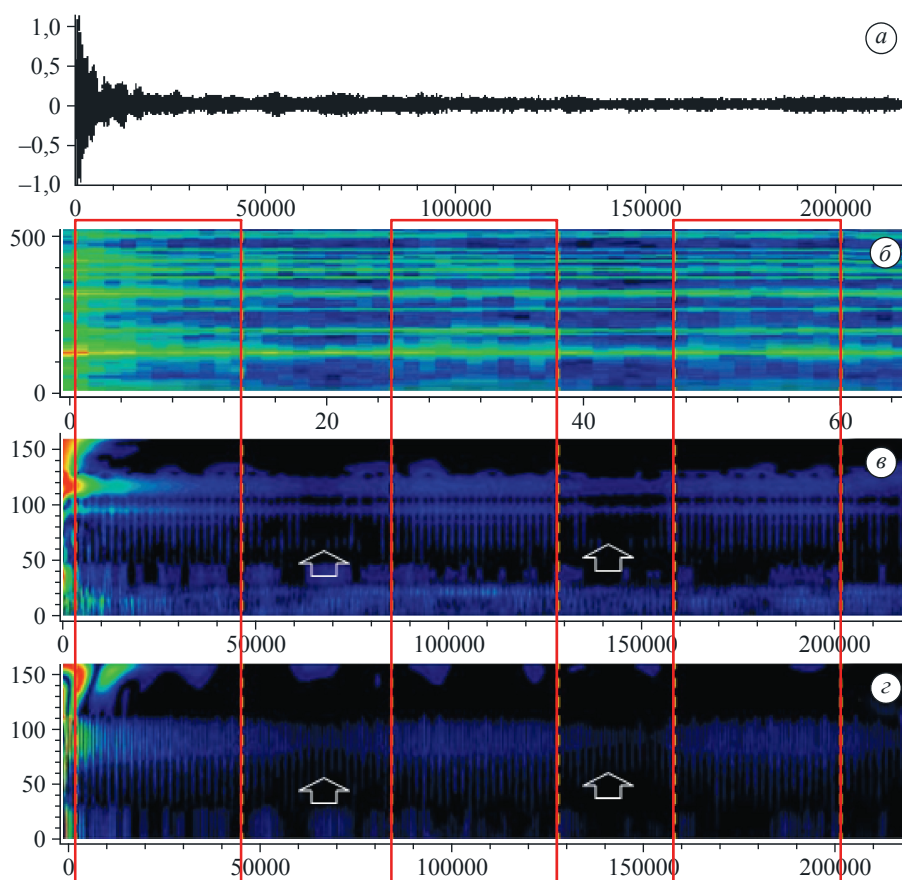


Рис. 48. Частотно-временное преобразование силы трения скольжения для образца с дефектами. *a* — сигнал (сила трения), *б* — оконное преобразование Фурье, *в* — вейвлет-преобразование по схеме Морле, *г* — вейвлет-преобразование по схеме «Мексиканская шляпа».

В том же Институте методом подвижных клеточных автоматов проведено трехмерное моделирование процесса трения скольжения нанослайдера по поверхности материала с периодически расположенными порами наноразмера. Проведен частотно-временной анализ изменения силы трения скольжения (нанотрибоспектроскопия) с помощью оконного фурье-преобразования и вейвлет-преобразования с различными базовыми функциями (Морле и «Мексиканская шляпа»). Показано, что такой анализ позволяет сделать оценку локализации (показано стрелками на рис. 48) нанопор вблизи поверхности. Экспериментальные исследования подтвердили результаты моделирования.

На примере низкоуглеродистых микролегированных (Mo, V, Nb, Ti) сталей 10Г2ФТ и 06МБФ показана возможность увеличения предела текучести и временного сопротивления в 1,6—2,0 раза за счет формирования в них ультрамелкозернистой структуры, стабилизированной ультрадисперсной карбидной фазой (рис. 49). Ультрадисперсная карбидная фаза играет определяющую роль в сохранении ультрамелкозернистой структуры при высокотемпературных отжигах, препятствуя миграции границ зерен, перераспределению и аннигиляции дефектов кристаллического строения (рис. 50).

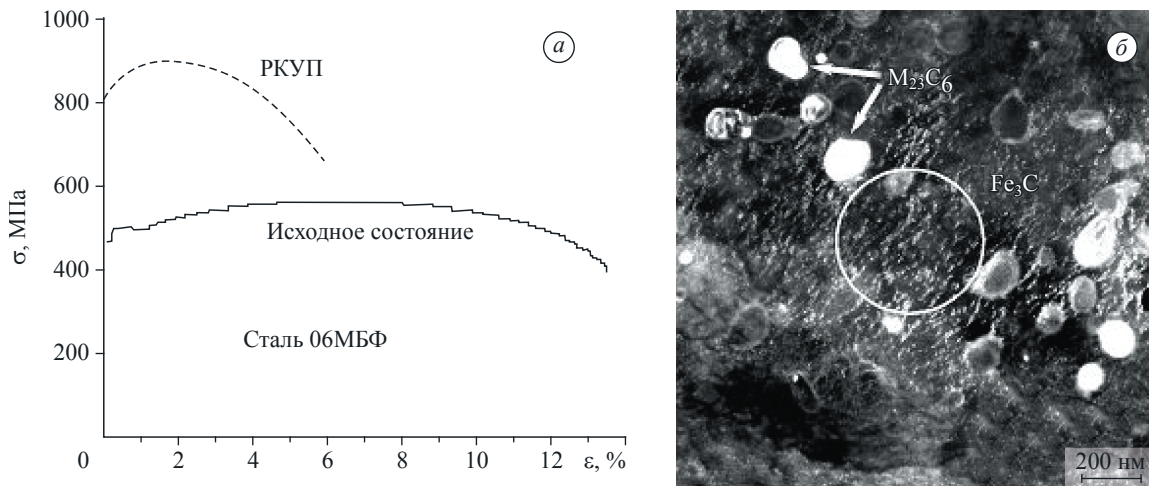


Рис. 49. Диаграмма растяжения (а) и микрофотография выделения карбидных фаз (б) в стали 06МБФ.

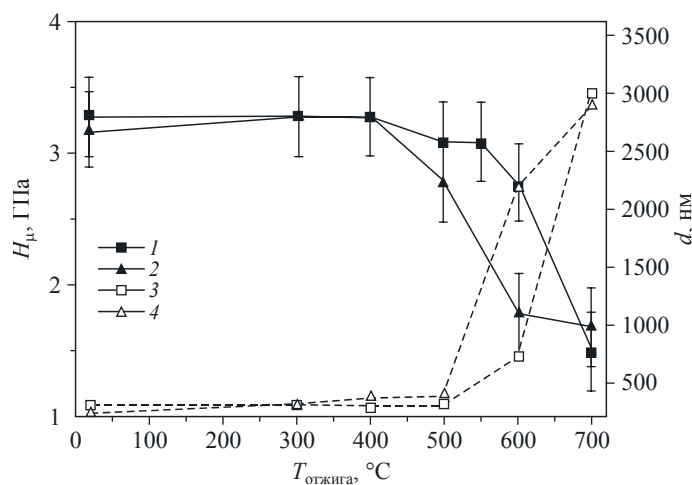


Рис. 50. Зависимость микротвердости от температуры отжига для ультрамелкозернистых низкоуглеродистых сталей, полученных методом равноканального углового прессования.

1, 2 — микротвердость, 3, 4 — размер (суб)зерна. 1, 3 — ферритная сталь 06МБФ, 2, 4 — ферритно-перлитная сталь 10Г2ФТ.

Программа Ш.20.3. Исследование многоуровневых процессов деформирования и разрушения неоднородных материалов и конструкций, живучести и аварийных ситуаций технических систем (координатор член-корр. РАН Б. Д. Аннин)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева для многих современных высокопрочных труднодеформируемых и малопластичных конструкционных сплавов на основе железа, титана и алюминия экспериментально установлено геометрическое подобие кривых ползучести при постоянных напряжениях и температурах в нормированных переменных.

Экспериментально и теоретически обоснована возможность использования кинетических уравнений ползучести и повреждаемости в энергетической форме вплоть до начала разрушения с немонотонной зависимостью значения удельной работы диссипации на момент разрушения от вида напряженного состояния. Дана единая методика определения параметров функциональных зависимостей в кинетических уравнениях со скалярным параметром поврежденности, определяемым нормированной удельной работой диссипации. Система кинетических уравнений и методика обработки экспериментальных данных апробирована при одно-

осном и плоском напряженных состояниях вплоть до разрушения на тестовых задачах изгиба балок, кручения валов и квадратных пластин как для стационарных, так и для прерывистых, в том числе знакопеременных режимов нагружения.

В Институте физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова исследованы природа и состояние основных упрочняющих фаз в износостойких покрытиях, полученных электродуговой металлизацией порошковой проволоки с тугоплавкими добавками. Идентифицированы тугоплавкие частицы упрочняющей фазы Al_2O_3 в самих покрытиях и в области сплавления с подложкой. Выявлено, что при технологическом воздействии электродуговой металлизации частицы Al_2O_3 пребывали в расплавленном диспергированном состоянии, что согласуется с результатами проведенных оценочных расчетов нагрева при испарении тугоплавкой частицы в плазме электрической дуги.

Программа Ш.20.4. Физико-химическая механика гетерогенных сред и технологии на их основе (координатор акад. В. М. Фомин)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича предложен и реализован метод получения монодисперсных наноразмерных порошков карбидов титана, основанный на адиабатическом сжатии



Рис. 51. Фотография композитного сорбента.

смеси газообразных реагентов. Тестирование метода проводилось на примере реакции $TiCl_4 + CH_4 \rightarrow TiC + 4HCl$. Измерения размеров полученных частиц карбида титана показали, что предлагаемый способ позволяет получать практически монодисперсные порошки, в отличие от известных методов. Распределение по размерам частиц имеет два пика — около 80 нм и около 400 нм. Оценка размеров частиц методом удельной поверхности показала, что средний диаметр частиц равен 61,7 нм.

В том же Институте совместно с Институтом химии и химической технологии на основе механической и гидротермальной обработки продукта термохимической активации глинозема и полых проникаемых сферических избирательно проникаемых частиц создан композитный наноструктурированный сорбент гидроксид алюминия + микросферы (рис. 51). Исследование процессов сорбции и десорбции на

этом сорбенте показало, что коэффициент проницаемости по гелию для микросфер, прошедших процедуру гранулирования, увеличился практически на два порядка по сравнению с исходными микросферами, а также на порядок по сравнению со специально модифицированными ценосферами (рис. 52). Выявленные свойства используются при обогащении гелиевой смеси природного газа гелием.

Для напыления порошковых материалов создан промышленный вариант плазменного оборудования со стабильной распределенной кольцевой инъекцией порошка в поток термической плазмы. Новый плазмотрон с повышенной управляемостью и сроком службы электродов позволяет более чем на порядок увеличить эффективность нагрева и ускорения частиц дисперсной фазы, что обеспечивает принципиально новое качество получаемых плазменных покрытий. Так, для двухслойного покрытия (подслой из NiAl, основной слой — Al_2O_3) пористость керамического покрытия Al_2O_3 толщиной 500 мкм оказалась менее 2 %, а прирост твердости составил почти 30 единиц по шкале HRC.

В экспериментах на прозрачной плоской модели, копирующей структуру пор реальной

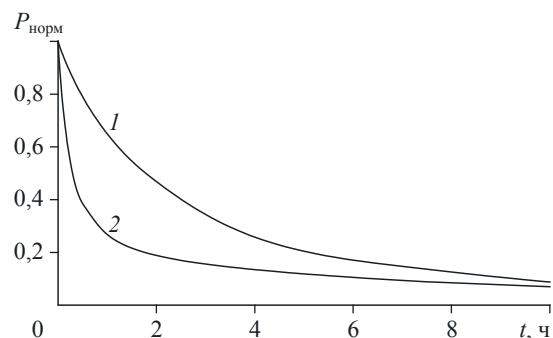


Рис. 52. Сравнение скорости изменения давления гелия в процессе сорбции для ценосфер (1) и композитного сорбента гидроксид алюминия + микросферы (2).

горной породы нефтяного пласта, непосредственно наблюдался процесс мобилизации капель нефти. Показано, что вибрационно-акустическое воздействие позволяет многократно снизить перепад давления, требуемый для того, чтобы капли пришли в движение и вышли из сужений пор.

В результате численного и экспериментального моделирования сварки взрывом предложено одно из возможных объяснений явления волнообразования при сварке взрывом

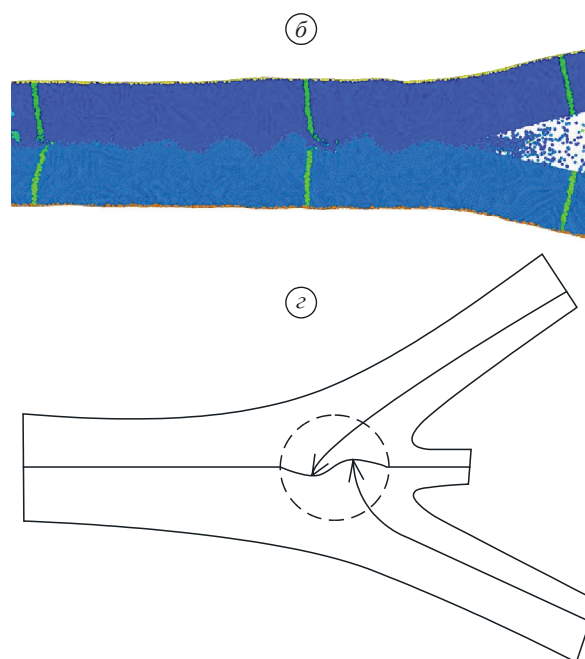
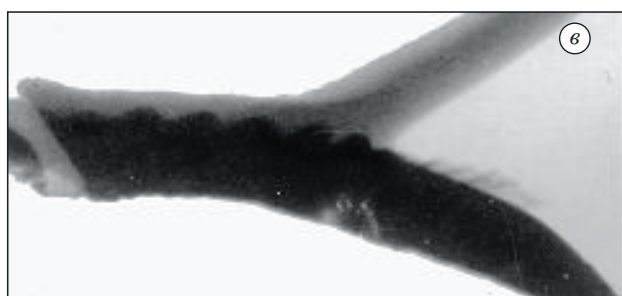
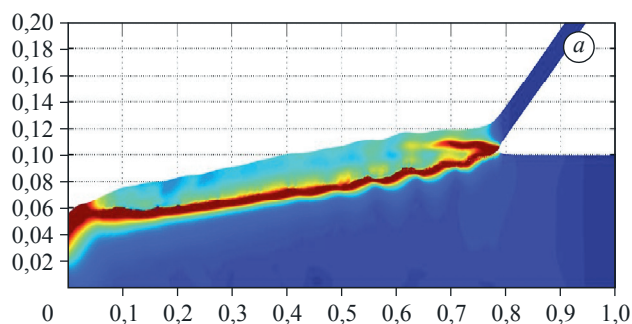


Рис. 53. Косое соударение металлических пластин:

a — численный расчет методом Годунова по релаксационной модели Максвелла; *б* — метод молекулярной динамики на основе многочастичного EAM-потенциала; *в* — эксперимент (метод импульсной рентгенографии); *г* — область повышенного давления выделена штрихом.

металлических пластин — задачи, поставленной М. А. Лаврентьевым еще в 60-х годах прошлого века (рис. 53). Показано, что образование волн происходит в окрестности точки контакта пластин в области повышенного давления и обусловлено автоколебаниями точек

приложения сил от верхней и нижней пластины при их соударении. В дальнейшем эти точки периодически меняются местами, создавая волны, которые «замораживаются» после выхода из выделенной области, где материал ведет себя уже упругим образом.