

11. Баталова М. В., Бахрах С. М., Винокуров О. А. и др. Комплекс СИГМА для расчета задач двумерной газодинамики // Тр. Всесоюз. семинара по численным методам механики вязкой жидкости.— Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1969.
12. Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф., Шанин А. А. Метод расчета газодинамических течений неоднородной среды в лагранжево-эйлеровых переменных // ДАН СССР.— 1984.— Т. 276, № 4.
13. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.

г. Москва

Поступила 27/IV 1988 г.

УДК 532.135+539.04

Б. К. Барактин, А. А. Прус, Г. Г. Савенков

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРЕГРАД ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВНЕДРЕНИИ ПЛОСКИХ СТРУЙ

В теории высокоскоростного деформирования металлических преград интенсивно развиваются численные методы решения задач внедрения с начальными скоростями соударения 1—4 км/с [1—3]. Но, несмотря на использование большого количества подгоночных параметров, усложнение алгоритмов и программ вычислений, совпадение расчетных и экспериментальных результатов остается неудовлетворительным. Например, считается [4], что наиболее перспективное направление исследования высокоскоростного упругопластического деформирования материалов связано с определением вязкой составляющей сопротивления, однако коэффициент вязкости, найденный по разным методикам, может отличаться на 1—2 порядка [4, 5]. Среди причин такого несоответствия можно указать на отсутствие достоверных данных о свойствах материалов преград и физических процессах при столь высоких скоростях проникания [6].

В настоящее время в физике прочности и пластичности усиленно разрабатываются новые идеи о пластической деформации кристаллов, когда трансляция на одном структурном уровне сопровождается поворотом на другом, и наоборот [7]. Выраженный коллективный эффект массоперемещения за счет движения ансамблей дефектов проявляется в вихревом характере пластической деформации и может быть представлен как область сильно возбужденного состояния в объеме кристалла во внешнем поле аналогично гидродинамическому течению твердых тел в сильных неоднородных внешних полях [8]. Поскольку ротации вещества вносят, как правило, доминирующий вклад в общую деформацию [9], в данной работе сделана попытка проследить изменение микроструктуры металла преграды после высокоскоростного внедрения плоской струи со скоростью соударения 2,7—3,2 км/с. С этой целью проведены металлографический и рентгеноструктурный анализы строения металла преграды на различном удалении от места внедрения струи.

Для изучения были взяты деформированные преграды из сталей и сплавов различной прочности (см. таблицу). Из них изготавливались шлифы, вырезанные поперек плоскости внедрения скоростной струи. Микротвердость измерялась с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н на трех уровнях проникания: у поверхности соударения, в середине и у дна каверны с шагом 0,1 мм от края кратера. Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре ДРОИ-2 с использованием излучения Fe — k_{α} ($1,93 \cdot 10^{-10}$ м) и плоского графитового монохроматора на дифрагированном луче. Рентгеновская съемка осуществлялась на тех же глубинах каверны, что и при металлографическом анализе, где исследовалось не менее трех участков: первый — вдоль края каверны, а последующие отстояли от него с шагом 2 мм. Диаметр облучаемого участка не более

Материал	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	Условная глубина проникания *	Микротвердость, ГПа									Полуширина, 10^{-2} рад		
			Расстояние от берега каверны, мм											
			0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0	2	4	
Ст. 20	515	1	2,58	2,1	2,1	1,93	1,88	1,88	1,83	1,68	3,1	3,1	3	
		2	3,5	2,36	2,1	2,1	2,06	1,93	1,93	1,88	3,3	4,2	3	
		3	2,22	2,17	2,1	1,99	1,88	1,84	1,84	1,78	2,9	3,6	3,2	
Ст. 40X	965	1	3,66	3,21	3,03	3	3	2,85	2,7	2,56	4	3,7	3,4	
		2	4,25	3,41	3,29	3,2	3,1	3,1	3	2,78	5,4	5	3,6	
		3	3,64	3,15	3,04	3,01	3	2,85	2,77	2,64	4,7	4,7	3,5	
АМг-6	370	1	1,56	1,32	1,28	1,27	1,27	1,25	1,14	1,1	3,6	3,2	3,1	
		2	1,85	1,64	1,45	1,4	1,39	1,39	1,25	1,18	3,8	3,3	3,3	
		3	1,69	1,44	1,4	1,4	1,38	1,38	1,3	1,2	5,2	3	2,9	
ВТ6-С	745	1	3,17	2,63	2,54	2,47	2,44	2,36	2,1	2,1	1,7	1,7	1,7	
		2	3,54	2,86	2,86	2,77	2,77	2,44	2,36	2,17	1,6	1,8	1,7	
		3	3,28	2,67	2,6	2,54	2,46	2,4	2,3	2,1	1,6	1,7	1,7	

* 1 — у поверхности соударения, 2 — в середине каверны, 3 — у дна кратера.

2 мм. На рентгенограммах, зарегистрированных при больших углах дифракции, измерялась ширина дифракционных линий на половине высоты максимума (полуширина). При выбранных условиях съемки полуширина характеризует функцию распределения остаточных упругих деформаций кристаллической решетки, возникших в процессе пластической деформации, и прямо пропорциональна плотности дислокаций [10].

На рис. 1 приведены фотографии микроструктуры (с увеличением $\times 50$) пластичной Ст. 20, а на рис. 2 — высокопрочной стали 40X на различной глубине проникания: *a* — вблизи поверхности соударения, *б* — в середине каверны, *в* — у дна кратера. Для наших условий эксперимента

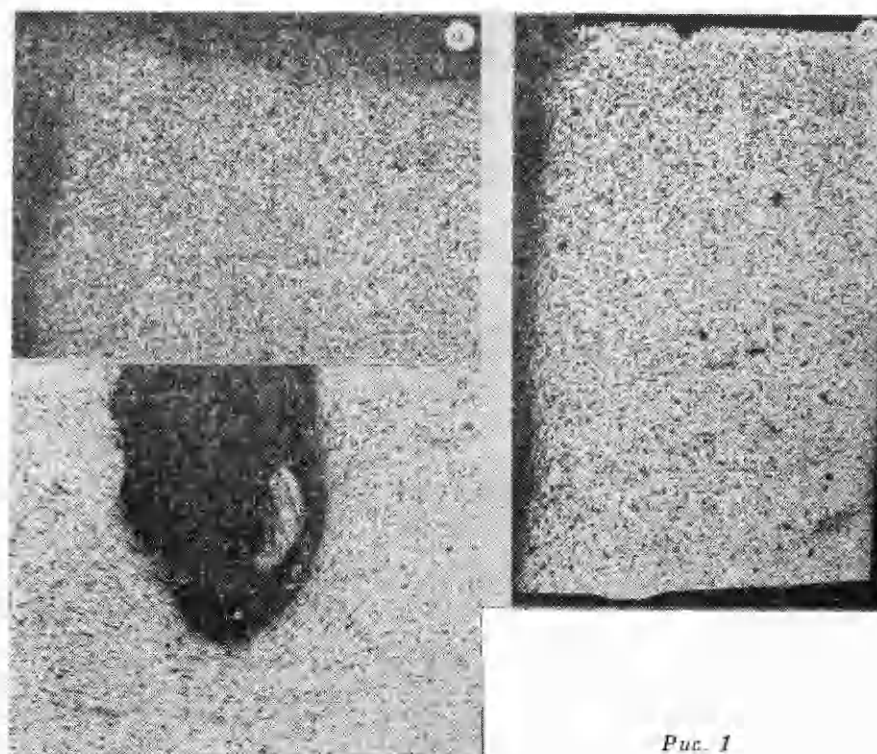


Рис. 1

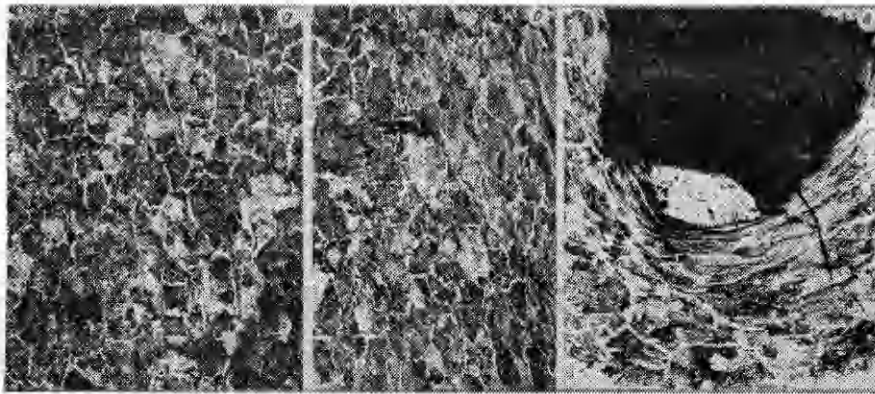


Рис. 2

в преградах толщиной 15—20 мм возникала каверна глубиной 4,5—5 мм. Независимо от прочности рассматриваемого металла в микроструктуре шлифа можно выявить две зоны различного строения. В первой, протяженностью 0,1—0,3 от глубины каверны и расположенной вблизи поверхности соударения, не наблюдается заметных измельчений и ротаций субзеренной структуры, вторая зона выявляется по берегам каверны и у дна кратера. В ней видны коллективные развороты зерен с одновременным изменением их геометрических размеров. Результаты замеров микротвердости и данные рентгеноструктурного анализа также указывают на существование двух зон, выявленных металлографией.

По совокупности экспериментальных данных можно предположить, что при внедрении высокоскоростной струи в первой зоне происходит раскалывание металла преграды с полным выносом очень мелких его частиц. Дальнейшее проникание струи сопровождается развитием процессов, когда одновременно могут происходить пластическая деформация отдельных структурных элементов (зерен) и их перемещение и поворот как целого. Это является признаками ротационной пластической деформации на разных структурных уровнях: от мезоскопического (уровень дислокационных субструктур), что фиксируется по изменению полуширины, до структурного, характеризуемого ротациями групп зерен. Сказанное означает также, что при решении задач о сопротивлении преград высокоскоростному внедрению необходимо использовать представления теории пластичности в двухуровневых средах [11, 12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Сагомян А. Я., Филимонов В. А. К проблеме наклонного проникания твердого тела в преграду // Вести. МГУ. Сер. 1. Математика, механика.— 1981.— № 5.
2. Звягин А. В., Сагомян А. Я. Косой удар по пластине из идеального пластического материала // МТТ.— 1985.— № 1.
3. Рубнов М. В. О соударении плоских струй псевдопластической жидкости со свободной границей // ПМТФ.— 1983.— № 6.
4. Степанов Г. В. Влияние скорости деформации на характеристики упругопластического деформирования металлических материалов // ПМТФ.— 1982.— № 1.
5. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок.— Киев: Наук. думка, 1979.
6. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов/Под ред. М. А. Мейерса, Л. Е. Мурра.— М.: Металлургия, 1984.
7. Панин В. Е., Гриняев Ю. В. и др. Структурные уровни деформации твердых тел // Изв. вузов. Физика.— 1982.— № 6.
8. Олемской А. И., Наумов И. И., Панин В. Е. О природе конвективного состояния кристаллов в условиях «сверхвысокое давление + сдвиг» // Изв. вузов. Физика.— 1986.— № 6.
9. Владимиров В. И., Романов А. Е. Дисклинации в кристаллах.— Л.: Наука, 1986.
10. Вишняков Я. Д. Современные методы исследования структуры деформированных кристаллов.— М.: Металлургия, 1975.
11. Лихачев В. А. Модели дислокаций и дисклинаций в механике // Модели в механике сплошной среды.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1979.

12. Лихачев В. А. Пластичность металлов, не связанная с дислокациями // Тез. докл. XI Всесоюз. конф. «Физика прочности и пластичности металлов и сплавов», 24—26 июня 1986 г. — Куйбышев: КПИ, 1986.

г. Ленинград

Поступила 5/VIII 1986 г.,
в окончательном варианте — 11/V 1988 г.

УДК 620.178.3 : 620.179.13

Г. А. Куриленко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ МАТЕРИАЛОВ

Термодинамический подход при определении механических характеристик материалов сам по себе не нов. Он применялся ранее [1—5], но не получил, на наш взгляд, достаточного развития в силу несовершенства используемой аппаратуры. Появившиеся в последние годы довольно совершенные приборы для неконтактного измерения температуры (тепловизоры, радиометры) позволили вернуться к этому вопросу.

В данной работе показано, что при поэтапном циклическом нагружении образца (детали) можно по изменению температуры его поверхности определить мощность тепловыделения в очаге зарождения усталостной трещины, подсчитать изменение энтропии в очаге, а затем по полученной таким образом информации предсказать предел выносливости испытанного объекта. Для измерения температуры использовалась стандартная аппаратура. Работа не выходит за рамки феноменологического подхода.

1. Методика эксперимента. Эксперимент проводился на двух типах образцов: тонкостенных трубчатых (рис. 1) и призматических консольных (рис. 2), изготовленных из Ст. 45; трубчатые подвергались продольным колебаниям, а призматические — изгибным по первой собственной форме на вибрационной установке «Турбо-4». Осуществлялось поэтапное циклическое нагружение образцов со ступенчато возрастающей от этапа к этапу амплитудой колебаний, начиная с напряжений, заведомо меньших предполагаемого предела выносливости, и заканчивая напряжениями, несколько превышающими его. Продолжительность нагружения на каждом этапе относительно небольшая (не более 3 % от обычно принятой базы классических испытаний при напряжениях ниже предполагаемого предела выносливости или от долговечности образца на соответствующем уровне напряжения при напряжениях выше предела выносливости). На каждом этапе нагружения развешивалось во времени температурное поле поверхности образцов с помощью тепловизора «Рубин МТ», нижний порог чувствительности которого составляет 0,1 °С. После каждого этапа нагружения образец охлаждался до исходного состояния и записывалась осциллограмма его свободных затухающих колебаний, начиная от тех амплитуд, при которых происходило нагружение. По этим осциллограммам выполнялась проверка полученных результатов известным методом внутреннего трения [6]. Режим свободных затухающих колебаний осуществлялся в специальном виброизолированном устройстве, приспособленном для измерения уровня внутреннего трения.

2. Расчетные формулы. Расчетная схема трубчатого образца представлена на рис. 3. Посредине образца нанесен концентратор напряжения (строго концентрическая риска глубиной 0,1 мм), для того чтобы отвод тепла при колебаниях образца осуществлялся симметрично в оба конца,

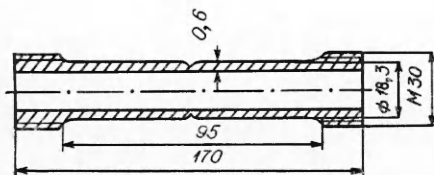


Рис. 1

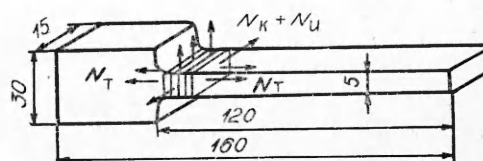


Рис. 2