

13. Pande C.S., Singh A.K., DasGupta A. Materials science of high-temperature superconductors. — J. Metals, 1988. — 40, N 1. — P. 10—13.
14. Прюммер Р. Обработка порошковых материалов взрывом / Пер. с нем. — М.: Мир, 1990.
15. Бушуева В.К., Епанчинцев О.Г. К измерению твердости контактных соединений металл / ВТСП-керамика // Заводская лаборатория. — 1993. — 59, № 5. — С. 43—44.
16. Епанчинцев О.Г., Колесников Д.П. Способ определения электросопротивления высокотемпературной сверхпроводящей керамики / Патент Российской Федерации № 2003129. Опубл. 15.11.93. Бюл. № 41—42.

630090, г. Новосибирск
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию
3/Х 1993,
после доработки — 19/V 1994

УДК 621.762 + 539.26

Р.П. Дидык, К.И. Козорезов

УСЛОВИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СУБМИКРОТРЕЩИН ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

Методом электронной микроскопии выявлено и исследовано образование субмикротрещин, залегающих на достаточно большом расстоянии от источников возмущения, в условиях действия сильных ударных волн. Определены теоретически и подтверждены экспериментально предельные параметры ударных волн (давление, степень деформации), при которых исключается образование субмикротрещин.

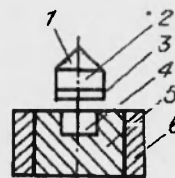
В настоящее время использование ударных волн (УВ) для упрочнения металлических изделий получило широкое распространение. Значительные успехи, достигнутые в этой области, связаны с освоением экстремальных физических параметров. Однако наряду с положительным влиянием УВ на свойства металлов в ряде случаев наблюдаются отрицательные эффекты, в частности, раскрытие существующих микродефектов, а также образование новых. Это снижает долговечность и эксплуатационную стойкость упрочненных взрывом деталей. Сам факт нарушения сплошности материала тесно связан с природой распространения и взаимодействия УВ. В этой связи исследование условий возникновения микротрещин, а при ударно-волновой обработке металлов и разработке эффективных мер, предотвращающих их образование, вызывают научный и практический интерес.

Взрывное воздействие на металлы носит волновой, кратковременный характер распространения нагрузки, приводящей к локализации напряжений, повышению плотности дислокации, росту прочностных характеристик. Вследствие большого разнообразия металлов и сплавов по физико-механическим свойствам, структуре, химическому составу не существует единого механизма, объясняющего природу упрочнения металлов в УВ. Тем не менее, как отмечается в [1, 2], степень упрочнения металлов во многих случаях определяется амплитудой давления УВ, а в некоторых — оценку ведут по величине деформации за фронтом ударной волны, форме и длительности прилагаемого импульса сжатия. Однако, несмотря на различие в подходах, во всех случаях степень упрочнения определяется количеством искажений кристаллической решетки, вызываемых прохождением УВ. В результате происходит рост параметров прочности металлов с одновременным снижением характеристик пластичности.

Цель упрочнения металлов — увеличение их прочности, которая достигается взрывом при высоких давлениях ударных волн. Сопутствующее этому изменение пластичности и возможность нарушения сплошности металла часто не учитывается, особенно на уровне субмикротрещин, что для условий эксплуатации недоступно.

© Р.П. Дидык, К.И. Козорезов, 1995.

Рис. 1. Схема обработки металла плоскими ударными волнами.



Фундаментальные исследования явления накопления дефектов и образование субмикротрещин при статическом растяжении образцов из армко-железа были проведены в работах [3, 4]. Установлено, что появление субмикротрещин происходит в микроструктуре при достижении некоторой критической деформации, выраженной величиной относительного удлинения порядка 10 %. В условиях действия плоских УВ в устройствах, исключающих смещение боковых сторон образца и создающих одноосную деформацию, исследовалась зависимость степени деформации ϵ от реализуемого давления p . Деформация на ударном фронте происходит в две фазы: вначале имеет место упругое сжатие до некоторого предела, а затем происходит быстрая релаксация напряжений путем зарождения дислокации в ранее свободной от дефектов кристаллической решетке.

Взрывной обработке были подвергнуты образцы из Ст. 110Г13Л, никеля и Ст. 20. Схема экспериментальной сборки показана на рис. 1. Полная деформация определялась по изменению объема:

$$\epsilon = 4/3\pi \frac{c + (\lambda - 1)u}{c + \lambda u},$$

а величина давления находилась из выражения для случая одноосной деформации:

$$p = \rho_0(c + \lambda u)u,$$

где c и λ соответственно местная скорость звука и коэффициент сжимаемости материала; u — массовая скорость, ρ_0 — начальная плотность металла.

Рассчитанная зависимость $\epsilon(p)$ приведена на рис. 2 штриховыми линиями. Здесь же сплошными кривыми показана зависимость относительного удлинения δ от величины реализуемого давления для образцов, предварительно упрочненных ударными волнами и прошедших последующее статическое испытание на одноосное растяжение. Кривые $\epsilon(p)$ построены по экспериментальным данным [5, 6]. Анализ полученных зависимостей показывает, что в точке пересечения кривых ϵ и δ одноосная деформация растяжения при разгрузке в УВ равна величине деформации, которую может выдержать упрочненный образец без разрушения при последующей статической деформации. Из рис. 2 следует, что при давлениях в УВ больших, чем в точках пересечения ϵ и δ , деформация в ударной волне больше, чем может выдержать металл, и при разгрузке наступает его разрушение. По мере увеличения давления разность $\delta - \epsilon$ возрастает, что увеличивает вероятность роста числа субмикротрещин. И, наоборот, при давлениях в УВ более низких, чем в точке пересечения кривых δ , ϵ , деформация в УВ меньше и вероятность образования субмикротрещин исключается. Из рис. 2 видны предельные параметры для указанных материалов:

	p , ГПа	ϵ , %
Ст. 110Г13Л	20,0	13,6
Никель	24,3	12,7
Ст. 20	14,4	10,1

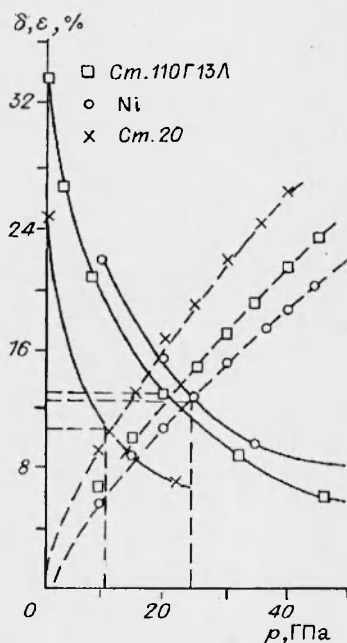
Таким образом, значение предельно допустимой деформации при обработке малоуглеродистой стали УВ совпадает с полученной в [3, 4] предельной деформацией при одноосном статическом растяжении армко-железа, при которой исключается появление субмикротрещин. Предельное давление УВ, соответствующее предельной деформации (10 %), близко к давлению

фазового перехода в железе (13 ГПа). Экспериментальное подтверждение условий образования субмикротрещин было получено на образцах из Ст. 20. Начальное давление УВ, генерированной в образце, составило 42,5 ГПа. Распространяясь в глубь образца, УВ затухала, и на расстоянии от поверхности $l = 12$ и 17 мм давление составило соответственно 20,0 и 13 ГПа. Субмикротрещины выявляли электронной микроскопией путем изготовления угольных реплик, которые снимались строго по участкам. Реплики без оттенения просматривались на электронном микроскопе «Tesla» при ускоряющем напряжении 60 кВ*.

Как показали исследования (рис. 3), при $l = 1 \div 17$ мм обнаружены субмикротрещины в полосах скольжения, а также по границам зерен, а при $l > 17$ мм от поверхности входа УВ субмикротрещины не обнаружены. Таким образом, выводы, полученные расчетным путем, получили экспериментальное подтверждение.

Результаты проведенных исследований, вскрывшие субмикротрещины и показавшие условия их образования, оказались столь неожиданными, что заставили совершенно по-новому взглянуть на проблему практического упрочнения металлов взрывом. С одной стороны, обработка металлов в сильных УВ (вправо от точки пересечения кривых δ и ϵ на рис. 2), когда реализуется в полной мере деформационный механизм упрочнения, сопровождаемый фазовыми превращениями, оказалась малоперспективной вследствие образования скрытых дефектов. С другой стороны, если рассматривать возможность упрочнения металлов взрывом при действии относительно невысоких давлений (влево от точки пересечения кривых δ и ϵ на рис. 2), то эффективность такой обработки крайне низкая, что выражается слабым изменением параметров прочности металлов. В связи с этим примечательным является факт обработки металлов взрывом, при котором реализуются высокие давления, вызывающие значительные превращения в металлах без их разрушения [7]. В таблице приведены результаты обработки взрывом Ст. П10Г13Л в зависимости от условий ее упрочнения.

Обработка была осуществлена практически при одних и тех же да-



лениях (правее точки пересечения кривых δ и ϵ , рис. 2). Следует обратить внимание на показатели пластичности. В первом случае характеристики пластичности снизились по сравнению с исходными в 2,5—3 раза, во втором случае, при том же давлении, но других условиях обработки, их значения остались на уровне, близком к исходным данным. К этому следует добавить, что первый вариант обработки неизменно сопровождался образованием субмикротрещин, в то время как при обработке слоистым зарядом разрушения отсутствовали.

Итак, в работе в первом приближении определены теоретически и подтверждены экспериментально предельные параметры ударных волн (давление и степень деформации), при которых исключается образование субмикротрещин для Ст. 20. Показано, что при разработке технологических процессов

Рис. 2. Зависимость степени деформации от величины давления.

*Электронная микроскопия проведена в институте металлургии им. Байкова РАН под руководством профессора В.С. Ивановой.

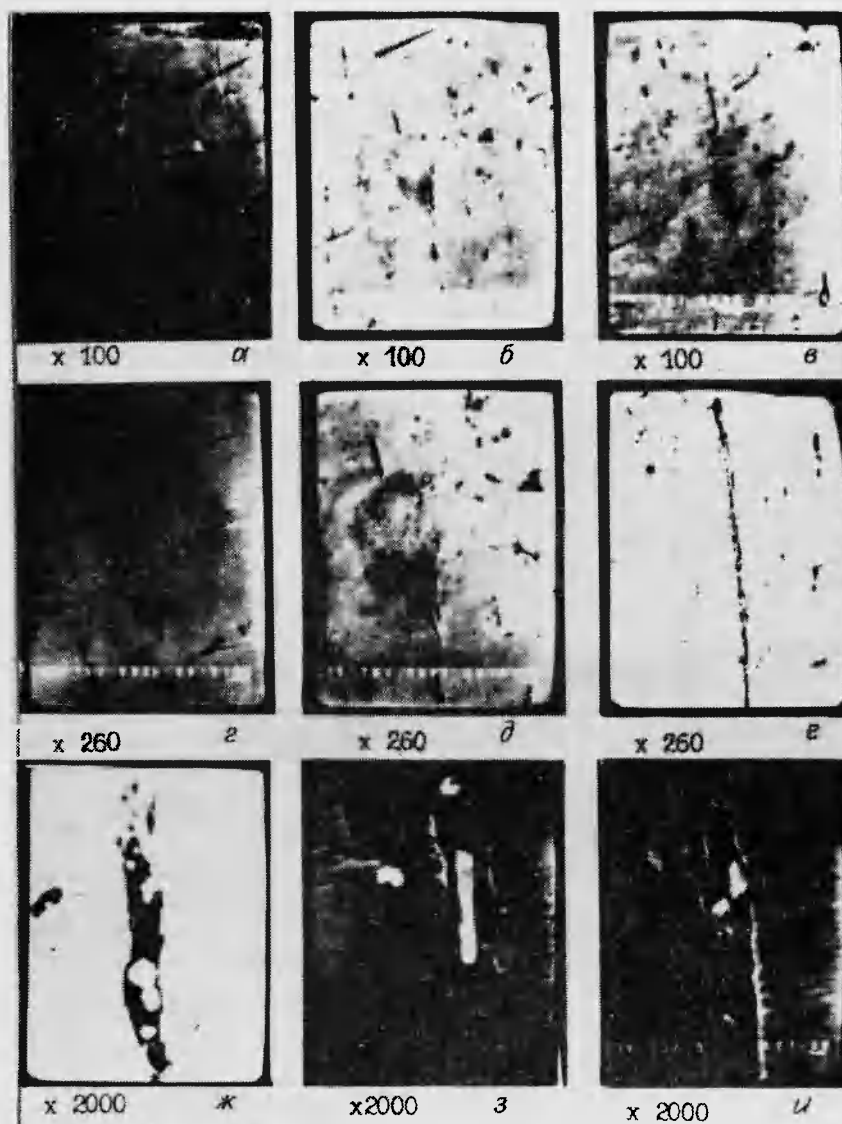


Рис. 3. Вид разрушений в Ст. 20 при различных увеличениях во вторичных электронах (начальное давление ударной волны 42, 5 ГПа, размеры субмикротрещин : ширина - $40 \div 45 \text{ \AA}$, длина - $100 \div 120 \text{ \AA}$).

упрочнения металлов взрывом по приведенной методике необходимо определить значения предельных параметров УВ — предельно допустимое давление и предельно допустимую степень деформации, исключающие появление субмикротрещин.

Схема упрочнения	H_B	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	χ , %	KCV Дж/см ²
Неупрочненная	180	705	430	30,0	36,0	2300
Однослойный заряд ВВ, $p = 33 \text{ ГПа}$	360	1140	970	9,0	20,0	600
Слоистый заряд ВВ, $p = 31 \text{ ГПа}$	412	1180	1010	22,0	28,0	1630

Примечание. σ_B — временный предел, σ_T — предел текучести. δ — относительное удлинение образцов при одноосном сжатии, KCV — ударная вязкость образца с V-образным концентратором напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козорезов К.И., Скугорова Н.Ф. Упрочнение сталей ударными волнами // Изв. АН СССР, ФизХОМ. — 1969. — № 2. — С. 78—83.
2. Дерibas А.А., Нестеренко В.Ф., Тесленко Т.С. Универсальная зависимость параметров упрочнения металлов от интенсивности ударно-волнового воздействия // ФГВ. — 1982. — 18, № 6. — С. 68—74.
3. Одинг И.А., Либеров Ю.П. Развитие повреждаемости в никеле при статическом растяжении // Изв. АН СССР. — Metallургия и топливо. — 1962. — № 6. — С. 126—128.
4. Одинг И.А., Либеров Ю.П. Накопление дефектов и образование субмикротрещин при статическом растяжении армо-железа // Изв. АН СССР. Metallургия и горное дело. — 1964. — № 1. — С. 18—21.
5. Соболенко Т.М. Исследование упрочнения некоторых металлов после воздействия взрывных нагрузок / Канд. дис. — Новосибирск, 1966.
6. Тесленко Т.С. Особенности структуры и свойств металлов в условиях взрывного нагружения / Канд. дис. — Новосибирск, 1981.
7. Дидык Р.П., Грязнова Л.В., Семенюк Е.Н., Усов О.Я. Возможный механизм действия двухслойного заряда ВВ при взрывном упрочнении металлов // ФГВ. — 1980. — № 1. — С. 124—125.

320600 г. Днепропетровск,
Государственная горная академия Украины
г. Москва
НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
26/VII 1993,
после доработки — 28/II 1994

УДК 534.222.2

В.В. Киселев

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МЕТАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИЕЙ ЗАРЯДОВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ПРОЦЕССА

Экспериментально изучалось метание металлических пластин скользящей детонацией заряда ВВ на начальном этапе процесса. Показано, что сжимаемость материала пластины может оказывать существенное влияние на динамику процесса метания. Предложена формула для оценки параметров метания, в которой учитываются как метательные, так и бризантные свойства ВВ.

Метание металлических пластин слоями взрывчатых веществ (ВВ) в режиме скользящей детонации широко применяется при обработке материалов взрывом и при проведении разного рода экспериментов. При этом скорость полета пластины является определяющим параметром процесса.

Скорость пластины v (рис. 1) связана со скоростью детонации заряда ВВ D и углом разворота пластины β при метании соотношением [1]

$$v = 2D \sin(\beta/2). \quad (1)$$

Если величину D можно измерить практически в любых условиях, то определение угла β или значения v требует постановки специального эксперимента. Поэтому часто используются различные способы численной оценки этих величин. Наиболее распространены два выражения: формула Гарни [1, 2], выведенная в приближении мгновенного взрыва для максимальной скорости полета пластины,

$$v = \sqrt{2E_G} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{r^2 + 5r + 4}}, \quad (2)$$

© В.В. Киселев, 1995.