



Рис. 6.

Таким образом, в данной работе предложен и реализован способ создания свободного газового заряда. Экспериментально на масштабах лабораторной установки обнаружен самоподдерживающийся режим детонации в таком заряде. Предложена формула для оценки критического диаметра свободного газового заряда, удовлетворительно совпадающая с результатами экспериментов.

Поступила в редакцию 19/II 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ио. Б. Харитон. Вопросы теории взрывчатых веществ. Вып. 1. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1947.
2. Ф. А. Баум и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
3. А. Н. Дремий и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
4. W. P. Sommers, R. B. Morrison. Phys. Fluids. 1962, 5, 241.
5. E. K. Dabora, J. A. Nicholls, R. B. Morrison. 10-th Symp. (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa., 1964.
6. S. Tsuge et al. Astr. Acta, 1970, 15, 377.
7. T. G. Adams. AIAA J., 1978, 16, 1035.
8. S. Tsuge, T. Fujiwara. ZAMM, 1974, 54, 157.
9. Я. Б. Зельдович, С. М. Когарко, Н. Н. Симонов. ЖТФ. 1956, 26, 1744.
10. В. В. Митрофанов, Р. И. Соловхин. Докл. АН СССР, 1964, 159, 5, 1003.
11. D. H. Edwards, M. A. Nettleton, G. O. Thomas. J. Fluid Mech., 1979, 95, 1, 79.
12. H. Matsui, J. H. Lee. 17-th Symp. (International) on Combustion. 1979.
13. А. А. Васильев, В. В. Григорьев. ФГВ, 1980, 16, 5.
14. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.

УДК 532.593.620.17.18

#### ВЛИЯНИЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АУСТЕНИТНОЙ ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩЕЙ СТАЛИ

O. A. Банных, B. M. Блинов, I. N. Гаврильев,  
A. A. Дерибас, T. M. Соболенко, O. П. Черногорова

(Новосибирск)

Взрывное упрочнение аустенитных сталей наиболее широко изучено на стали Г13Л, для которой оно применяется в промышленных целях с 1955 г. [1] как за рубежом, так и в СССР. Имеются работы, посвященные упрочнению взрывом нержавеющих сталей типа X18H9 [2—9]. Проведены исследования по влиянию обработки взрывом на процесс старе-

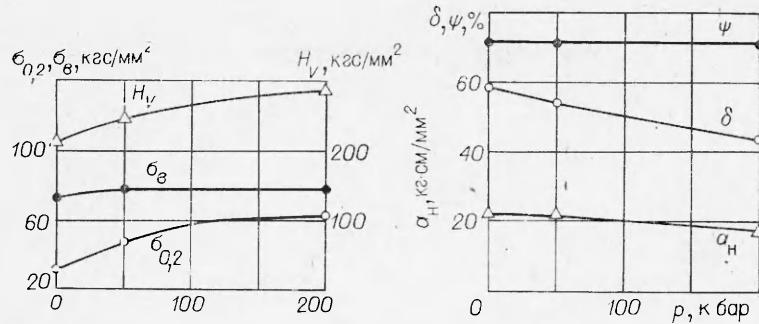


Рис. 1. Влияние взрывной обработки на механические свойства стали ЭП769.

ния аустенитных сталей, упрочняемых карбидами типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ , а также сталей и сплавов на никелевой основе, упрочняемых частицами  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  [7, 8]. В работе [8] на стали ХН28ВМАБ (ВЖ-100) и сплаве ХН60ВТ (ВЖ-98) показано значительное увеличение (в 2–8 раз) долговечности образцов в интервале температур от 700 до 900°C за счет повышения сопротивления ползучести в результате взрывной обработки. В литературе отсутствуют аналогичные данные по стареющим сталям, упрочняемым карбидами ванадия, которые в последние годы получили широкое применение [9].

В настоящей работе исследуется влияние обработки ударными волнами на структуру и свойства немагнитной дисперсионно-твердеющей стали 40Г14Н8Х3ЮФ (ЭП 769) [9]. Ударные волны в металле возбуждались по схеме детонации контактного заряда на поверхности образцов [11]. Давление в косой ударной волне от контактного взрыва составляло 50 и 200 кбар для двух используемых промышленных ВВ (аммонит 6ЖВ с плотностью  $\rho = 1 \text{ г}/\text{cm}^3$ , скоростью детонации  $D = 4,2 \text{ км}/\text{с}$ , толщиной заряда  $\delta_0 = 20 \text{ мм}$  и пластическое ВВ с  $\rho = 1,65 \text{ г}/\text{cm}^3$ ,  $D = 7,2 \text{ км}/\text{с}$ ,  $\delta_0 = 4 \text{ мм}$ ). Образцы  $14 \times 14 \times 160 \text{ мм}$  собирались в пакеты по 6 шт. и закладывались в защитные обоймы для предотвращения деформации в процессе взрывного нагружения. Сборки помещались на жесткое основание без зазора. Осадка образцов после обработки взрывом не превышала 3%. Перед обработкой взрывом образцы закаливали от температуры 1150°C (с выдержкой 1 ч) в воде. Старение заготовок, обработанных взрывом, проводили при температурах 550, 600 и 650°C в течение 5, 10, 16, 20, 24, 30 и 50 ч. Механические испытания выполнялись на стандартных испытательных машинах. Структура стали изучалась с помощью электронного микроскопа JEM-200 A, для чего из заготовок на электроискровой установке вырезалась фольга, которая затем утончалась по методу «окна» в универсальном электролите.

Взрывная обработка стали ЭП769 при давлениях 50 и 200 кбар приводит к существенному повышению предела текучести  $\sigma_{0,2}$  от 34 до 47 и 61  $\text{kg}/\text{mm}^2$  соответственно, предел прочности  $\sigma_m$  увеличивается незначительно (на 4–6  $\text{kg}/\text{mm}^2$ ), пластичность остается высокой (относительное удлинение  $\delta > 45\%$ , относительное сужение  $\psi > 70\%$ ), также как и ударная вязкость ( $a_u = 17 \div 22 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ ), а твердость, оставаясь постоянной по сечению каждого образца, возрастает от 215 до 250 и 280  $\text{kg}/\text{mm}^2$  (рис. 1). Полученные результаты несколько отличаются от данных по изменению механических свойств при изученных давлениях на нестареющих аустенитных сталях. Если резкий прирост предела текучести и твердости аналогичен наблюдаемым на других сталях, то прирост прочности оказался несколько меньше, а снижение пластичности значительно слабее выражено [2, 9].

Изучение структуры стали, подвергнутой обработке взрывом, на оптическом микроскопе показало ее сходство со структурой исходного материала. Электронно-микроскопические исследования позволили обнару-

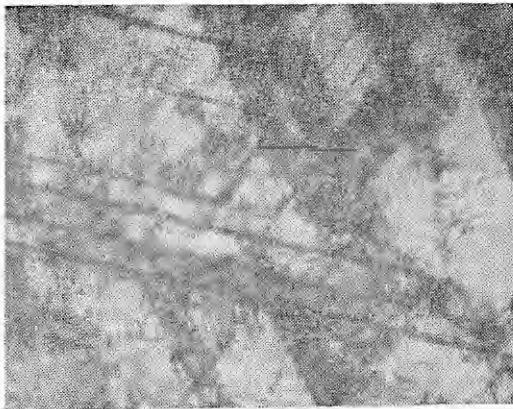


Рис. 2. Структура стали ЭП769 после обработки взрывом (200 кбар).  $\times 18\,000$ .

При относительно невысоких температурах старения (550 и 600°C) твердость образцов, подвергнутых обработке взрывом, была выше, чем неупрочненных взрывом, во всем диапазоне времени выдержки от 0 до 50 ч.

При низких температурах старения четко проявляется упрочняющий эффект предварительной обработки взрывом. Например, ударная обработка при давлении 50 кбар и старение при 600°C в течение 50 ч обеспечивают получение лучшего сочетания прочности и пластичности ( $\sigma_{0.2} = 100$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_b = 114$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\delta = 22\%$ ,  $\psi = 57\%$ ,  $a_n = 9$  кгс · м/см<sup>2</sup>), чем у той же стали, не подвергнувшейся обработке взрывом ( $\sigma_{0.2} = 80$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_b = 103$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\delta = 22\%$ ,  $\psi = 52\%$ ,  $a_n = 10$  кгс · м/см<sup>2</sup>). При температуре старения 650°C, оптимальной для старения стали ЭП769, преимущества предварительной взрывной обработки по данным твердости и прочности не выявляются. Однако пластичность и ударная вязкость стали, состаренной после обработки взрывом, были значительно выше (см. рис. 3 и таблицу).

Старение стали при 600°C не вызывает значительных изменений дислокационной структуры, полученной после упрочнения взрывом. Наблюдается гетерогенное выделение дисперсных сферических частиц карбида VC на дислокациях и некогерентных границах двойников, кроме того, идет, как обычно, и матричное выделение этих частиц. После старения при 650°C наблюдалось наличие С-образных выделений на дислокациях, однако матричное выделение частиц не подавляется и в этих условиях. Важно отметить, что около границ зерен стали, состаренной после упрочнения взрывом, отсутствовали зоны, свободные от выделений карбидов, которые наблюдаются обычно после старения ЭП769 при 650°C (рис. 4).

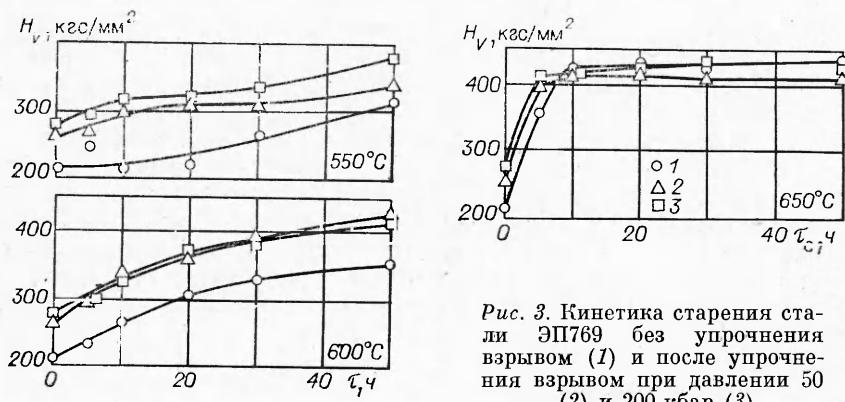


Рис. 3. Кинетика старения стали ЭП769 без упрочнения взрывом (1) и после упрочнения взрывом при давлении 50 (2) и 200 кбар (3).

**Механические свойства стали ЭП769 после различных режимов обработки и старения**

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_u$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\alpha_H$ , кгс·м/см <sup>2</sup>
3	34,1	71,8	59,2	72,6	22,0
3+C (600°, 50 ч)	80,0	103,0	22,0	52,0	10,0
3+C (650°, 20 ч)	110,4	119,5	8,2	28,6	6,0
3+OB (50 кбар)	46,8	76,4	53,6	72,6	22,5
3+OB (50 кбар)+C (600°C, 50 ч)	100,4	114,3	21,6	56,5	9,1
3+OB (50 кбар)+C (650°C, 10 ч)	102,1	117,5	18,0	48,0	6,0
3+OB (50 кбар)+C (650°C, 20 ч)	97,8	117,0	16,0	48,0	7,1
3+OB (200 кбар)	61,1	77,9	44,8	70,8	17,2
3+OB (200 кбар)+C (650°C, 10 ч)	102,7	117,9	18,4	53,4	8,2

П р и м е ч а н и е. 3 — закалка, С — старение, OB — обработка взрывом.

*a, б).* Повышение пластичности стали, состаренной после обработки взрывом, по-видимому, и обусловлено отсутствием зон, свободных от выделений, у границ зерен. Согласно [9], одним из эффективных путей уменьшения размера зон является пластическая деформация стали перед старением, которая возможна только для деталей простой формы и заготовок. Взрывная обработка, обеспечивая равномерное упрочнение на большой глубине, не приводит к макродеформации материала, однако увеличение плотности дефектов кристаллического строения способствует предотвращению образования упомянутых зон.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Обработка взрывом дисперсионно-твердящей немагнитной стали ЭП769 с давлением до 200 кбар приводит к ее упрочнению при незначительном снижении пластичности и ударной вязкости.

2. Отличие процесса старения стали ЭП769 после обработки взрывом состоит в наличии не только матричного, но и гетерогенного (на дислокациях и двойниках) выделений в теле зерна матрицы сферических частиц карбида ванадия. Также наблюдается отсутствие зон, свободных от выделений вблизи границ зерен.

3. Обработка взрывом вызывает снижение оптимальной температуры старения материала. Хорошее сочетание характеристик прочности и пластичности получено при обработке взрывом с давлением 50 кбар и последующем старении при 600°C в течение 50 ч. Повышение пластичности и вязкости после указанной обработки обусловлено отсутствием вблизи границ зерен зон, свободных от выделений.

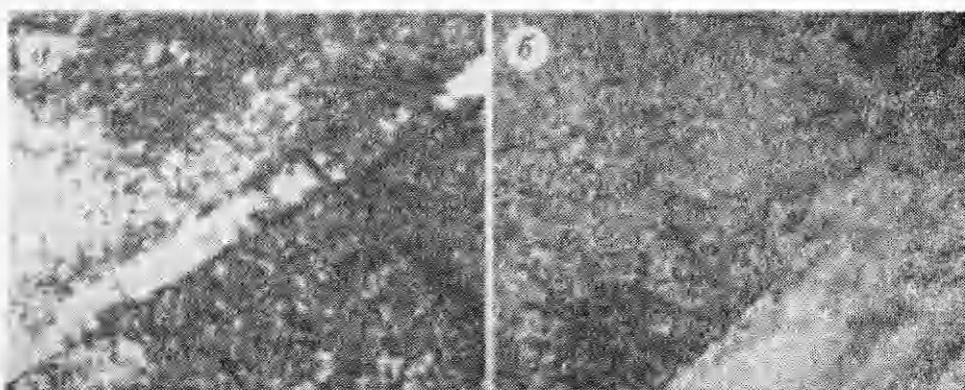


Рис. 4. Структура стали ЭП769 после старения при 650°C, 20 ч ( $\times 58\,000$ ) (а) и обработки взрывом (200 кбар) и старения при 650°C, 10 ч ( $\times 42\,500$ ) (б).

Изучение структурных изменений при сочетании обработки взрывом с термической обработкой требует дальнейших исследований на различных материалах.

Поступила в редакцию 25/VIII 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. N. A. McLeod. Method of Hardening manganese steel. US Patent 2.703.297, March, 1955.
2. G. E. Dieter.— In: Response of metals to High velocity of deformation. N. Y.— L.: Interscience. 1960, p. 409.
3. M. Kangilaski, J. S. Perrin et al. Met. trans., 1971, 2, 9, 2607.
4. L. E. Murr, F. I. Grace. Trans. AIME, 1969, 245, 10, 2225.
5. L. E. Murr, M. F. Rose. Philos. Mag., 1968, 18, 152, 281.
6. М. А. Смирнов, В. И. Левит и др. ФММ, 1978, 45, 1, 133.
7. Е. И. Богдановская, Л. В. Дубнов и др. ФГВ, 1976, 12, 5, 7.81
8. И. П. Гаврильев, А. А. Дерибас, Т. М. Соболенко. Изв. АН СССР. МТТ, 1979, 2, 174.
9. О. А. Банных, В. М. Блинов. Дисперсионно-твёрдеющие немагнитные ванадийсодержащие стали. М.: Наука, 1980.
10. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.

УДК 533.6.011.72

#### НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ СО СЛОЕНЫМИ ОБОЛОЧКАМИ

C. B. Стебновский, Н. Н. Черноваев

(Новосибирск)

При исследовании динамической прочности жидкости, а также в ряде прикладных задач (например, в задачах, связанных с гидровзрывной штамповкой металлов) возникает необходимость варьировать начальные параметры ударной волны и взрывного пузыря. Поскольку эти параметры зависят от свойств ВВ и динамической жесткости среды, в которой генерируется ударная волна, для управления начальными параметрами волны и пузыря представляется целесообразным использовать метод подбора специальных прослоек между зарядом ВВ и водой.

Настоящая работа посвящена исследованию характера прохождения ударных волн (УВ) через прослойки, состоящие из материалов с различной динамической жесткостью, определению начальной амплитуды УВ и закона ее затухания в ближней зоне (на расстоянии, меньшем 10 радиусов разряда).

Экспериментальные исследования взрыва цилиндрических зарядов ВВ со слоеными оболочками в воде проводились следующим образом. В объеме, заполненном водой 1 (рис. 1) и ограниченном плоскопараллельными пlexiglasовыми стенками 2, помещался цилиндрический заряд ВВ 4 в слоеной оболочке 3. В качестве стандартного цилиндрического заряда использовался высоковольтный электродетонатор ЭДВ-1, состоящий из заряда гексогена радиусом 0,325 см, и стальной оболочки толщиной 0,025 см. Предварительной импульсной рентгеновской съемкой установлено, что на рабочем участке  $L = 2,5$  см скорость распространения вдоль оси заряда процесса расширения стальной оболочки вследствие детонации гексогена  $D_* = 6,9$  км/с. Расстояние между тонкими боковыми стенками объема, параллельными оси заряда, выбиралось таким, чтобы УВ, генерируемые в воде в результате взрыва заряда, могли распространяться на расстояние 10 радиусов слоеной оболочки.