

пределах могут пригодиться при проектировании титановой ВЗК или для априорной оценки $\nu_{\max}(m)$ и $\epsilon_{\max}(m)$ эксплуатируемой титановой ВЗК. Прогнозировать разрушение эти формулы не позволяют, поскольку они получены без учета критерия разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов. — М.: Наука, 1975. — С. 63—68.
2. Шитов А.Т., Минеев В.Н., Клещевников О.А. и др. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций // ФГВ. — 1976. — 2, № 2. — С. 304—307.
3. Proctor J.F. Exp. Mech. — 1970. — 10, № 11. — Р. 458—466.
4. Цыпкин В.И., Иванов А.Г., Минеев В.Н. и др. // Атомная энергия. — 1976. — 41, вып. 5. — С. 303—308.
5. Ryzhanski V.A., Ivanov A.G., Timonin L.V. // Proc. of X Int. Conf. HERF-89. September 18—22, 1989, Ljubljana, Yugoslavia. — Р. 246—255.
6. Иванов А.Г., Минеев В.Н. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ. — 1979. — 15, № 5. — С. 70—95.
7. Иванов А.Г., Рыжанский В.А., Цыпкин В.И. и др. Экспериментальное исследование влияния масштаба на прочность котла высокого давления при внутреннем взрывном нагружении // ФГВ. — 1981. — 17, № 3. — С. 102—108.
8. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. — М.: Наука, 1975.
9. Рыжанский В.А., Минеев В.Н., Герман В.Н. и др. // Изв. АН СССР. Металлы. — 1978. — № 5. — С. 139—141.
10. Коул Р. Подводные взрывы. — М.: Иностранная литература, 1950.

607200, г. Арзамас-16,
ВНИИЭФ

Поступила в редакцию 12/VIII 1993,
после доработки — 22/X 1993

УДК 620.178.7:620.179.4

В.К. Голубев, К.Г. Рабинович, В.П. Белова,
Л.М. Морозова

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБРАЗЦОВ С МЕДНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ВЗРЫВОМ ЛИСТОВОГО ЗАРЯДА ВВ

Представлены результаты исследования разрушения образцов из низкоуглеродистой стали и меди с нанесенным гальваническим медным покрытием при их нагружении взрывом листового заряда ВВ. Полученные результаты по определению динамической адгезионной прочности медного покрытия на стали и откольной прочности стали и меди приведены в виде зависимостей критического отрицательного давления в месте начала разрушения от градиента давления в растягивающем импульсе. С помощью методов металлографического и автоматизированного количественного анализа получены результаты по характеру повреждения образцов.

Защитные покрытия используются для предохранения элементов конструкций от механических, физических и химических воздействий. В связи с этим весьма актуальна проблема динамической адгезионной прочности покрытий при воздействии кратковременных импульсных механических нагрузок. Для определения динамической прочности соединения разнородных материалов в [1] предложен и реализован способ, в котором образец, состоящий из двух слоев, нагружается ударом пластины; приведены результаты по динамической прочности полученного методом прокатки соединения слоев из стали и алюминия толщиной не менее 4 мм. В работе [2] для нахождения динамической адгезионной прочности тонких покрытий используется кратковременный механический импульс в системе подложка — покрытие, возбуждаемый импульсным лазерным излучением либо электрон-

© В.К. Голубев, К.Г. Рабинович, В.П. Белова, Л.М. Морозова, 1994.

Номер образца	Исходные данные			Условия отслоения		Условия откола		
	Тип образца	h_c , мм	h_e , мм	l_1 , мм	p_1 , ГПа	l_2 , мм	h_2 , мм	p_2 , ГПа
1	Покрытие стали	0,35	0,30	6	1,7	—	—	—
2		0,35	0,50	9/20*	1,8/0,7*	13	1,1	3,1
3		0,32	0,60	26*	0,5*	—	—	—
4		0,45	0,70	15	1,6	24	1,3	2,2
5		0,35	0,85	22	0,9	36	1,8	2,0
6		0,30	0,95	22	0,9	39	2,0	2,1
7		0,50	1,20	20	1,8	45	2,0	2,0
8	Сталь	—	0,62	—	—	18	1,0	2,5
9	Покрытие на меди	0,50	0,30	50	—	—	—	—
10	Медь	—	0,30	—	—	15	0,5	1,3

*Отслоение по границе сталь — никель.

ным пучком. Для реализации этого способа требуется довольно сложное техническое оборудование.

В [3] для определения условий откольного разрушения материалов при воздействии кратковременного механического импульса образец в форме клина нагружался взрывом листового заряда ВВ. Эта методика позволяет находить критические условия начала разрушения, которые реализуются на определенной толщине образца. В [4] указанный способ реализован для получения предварительных результатов по динамической адгезионной прочности гальванического медного покрытия на стали.

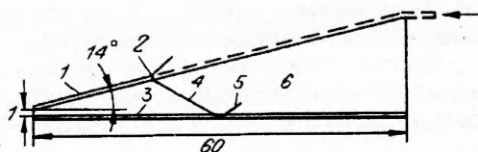
По сравнению с работой [4], в которой только рассмотрена возможность использования метода [3], круг рассматриваемых задач в данной работе существенно расширен. С использованием металлографического анализа в ней получена информация о качественном характере отслоения покрытия, разрушения его самого и подложки. С помощью метода автоматизированного количественного анализа получены данные о количественном характере поврежденности материалов в зонах частичного разрушения. И наконец, достаточно корректно оценены критические условия начала отслоения покрытия и откольного разрушения материала подложки.

Гальваническое медное покрытие на образцы из стали наносилось после обезжиривания защищаемой поверхности, анодного травления в разбавленной серной кислоте и нанесения никелевого подслоя толщиной 4—6 мкм в электролите на основе сульфата никеля. Последующее гальваническое осаждение меди проводили в электролите на основе сульфата меди при плотности тока 3—4 А/дм². Скорость осаждения составляла 20—30 мкм/ч. В одном случае медное покрытие наносили непосредственно на поверхность образца из меди.

Схема проведения опытов по нагружению образцов (шириной 40 см) взрывом листового заряда ВВ показана на рис. 1. В двух опытах испытывались также образцы без нанесенного медного покрытия. Использовалось пластическое листовое ВВ с плотностью $\rho_e = 1,52$ г/см³ и скоростью детонации $D_e = 7,8$ км/с. После проведения опытов образцы осматривали и разрезали по перпендикулярному поверхности нагружения срединному сечению. Структура предварительно полированного среза выявлялась методом

Рис. 1. Размеры образцов и схема проведения опытов.

1 — слой ВВ; 2 — детонационный фронт; 3 — покрытие; 4 — ударная волна; 5 — волна разрежения; 6 — образец.



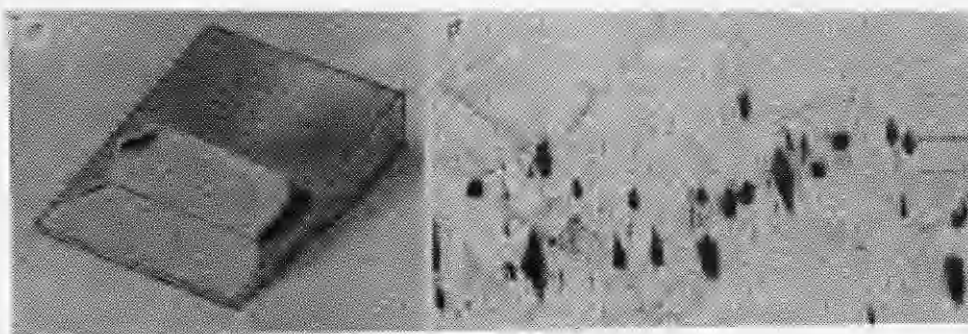


Рис. 2. Внешний вид медного образца без покрытия (а) и характер его откольного разрушения (б); $\times 100$.

химического травления. Рассматривали характер макроразрушения и проводили замеры образцов в местах его образования.

Исходные данные и полученные результаты представлены в таблице, где h_1 , h_2 , h_3 — толщины покрытия, слоя ВВ и откола; l_1 , l_2 — расстояния от вершины клинового образца до места начала отслоения покрытия и образования откола соответственно. Внешний вид некоторых из испытанных образцов приведен в работе [4]. На рис. 2 показан образец из меди, более детально исследованный в данной работе. Уже визуальный осмотр стальных образцов с нанесенным медным покрытием позволил определить, что покрытие от подложки отслаивается прежде всего путем разрушения медного слоя. Повышение интенсивности нагружения (толщины слоя ВВ) в определенных пределах приводит к увеличению зоны отслоения, размер которой характеризуется расстоянием l_1 . В образцах 2 (частично с краю) и 3 (полностью) отслоение покрытия произошло по границе раздела сталь — никель, что привело к отмеченному в таблице увеличению зоны отслоения. В случае медного образца с нанесенным медным покрытием визуально наблюдаемое отслоение покрытия происходит по границе раздела подложка — покрытие.

С целью получения более полной информации о характере происходящих разрушений все испытанные образцы детально обследовали методом металлографического анализа. Подготовленные шлифы рассматривали при увеличении до 100, что позволяло выявить все основные характерные особенности произошедших разрушений. В стальных образцах с нанесенным медным покрытием наряду с отслоением медного покрытия образовалось откольное разрушение в материале подложки (низкоуглеродистая сталь). Приведенные в таблице координаты начала образования откола (l_1 , h_3) соответствуют появлению тонкой магистральной откольной трещины, отмеченной при небольшом увеличении (рис. 3). В данном случае в приведенную толщину откола входит и толщина медного покрытия.

Основным способом отслоения покрытия действительно является разрушение медного слоя, что можно наблюдать на рис. 3, 4, однако фактически во всех образцах могут быть выявлены участки отслоения по другим механизмам, в частности отслоение никелевого подслоя от стальной подложки и медного покрытия от никелевого подслоя (см. рис. 4). Имеются участки, где отслоение происходит по стальной подложке. В медном образце с нанесенным медным покрытием отслоение происходит, как правило, по границе раздела, причем начальная стадия разрушения характеризуется образованием повреждений в приграничном слое покрытия (рис. 5). Откольное разрушение медных и стальных образцов без нанесенного покрытия имеет вязкий характер, обусловленный образованием и ростом пор (см. рис. 2), и квазихрупкий, обусловленный образованием и ростом небольших трещин, аналогичных показанным на рис. 3.

Получаемая с помощью металлографического анализа информация о характере происходящих в испытанных образцах разрушений носит качественный характер. Для количественной информации о поврежденности ма-

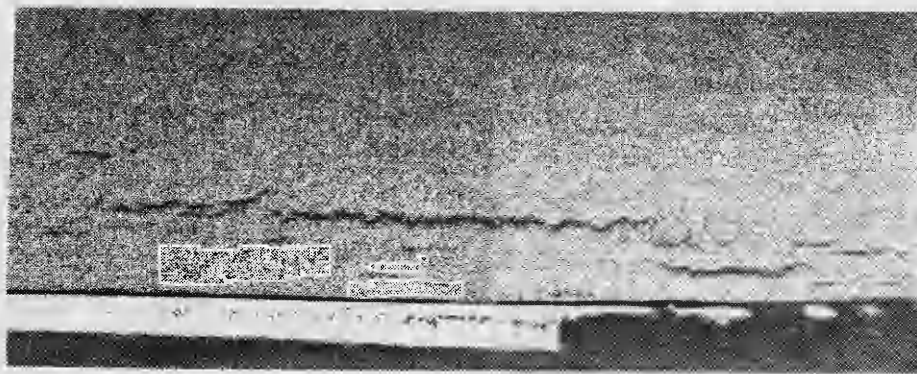


Рис. 3. Характер разрушения медного покрытия и стальной подложки на примере образца 2; $\times 20$.



Рис. 4. Участки отслоения разрушенного медного покрытия по границе раздела сталь — никель (а) и никель — медь (б); $\times 100$.

териалов в зонах частичного (неполного) разрушения два из испытанных образцов обследованы с помощью метода автоматизированного количественного анализа. Использовались полученные при 20-кратном увеличении изображения зоны неполного разрушения медного покрытия образца 2 и зоны неполного откольного разрушения медного образца 10. Они вводились в память компьютерной системы обработки изображений IBAS-2000, подвергались соответствующей процедуре измерительно-расчетной обработки, после чего информация по количеству и размерам повреждений выводилась в виде таблиц и гистограмм. Изображения зон рассматривали по участкам, размеры которых для образца 2 составляли 1,2 мм, а для образца 10 — 3,0 мм. В первом случае зона неполного разрушения покрытия была разделена на 4 участка, а во втором зона неполного откольного разрушения образца — на 12 участков. Полученные результаты приведены на рис. 6 в виде зависимостей количества повреждений n и их суммарной площади S на конкретном



Рис. 5. Характер разрушения медного покрытия (начало отслоения) на медной подложке; $\times 100$.

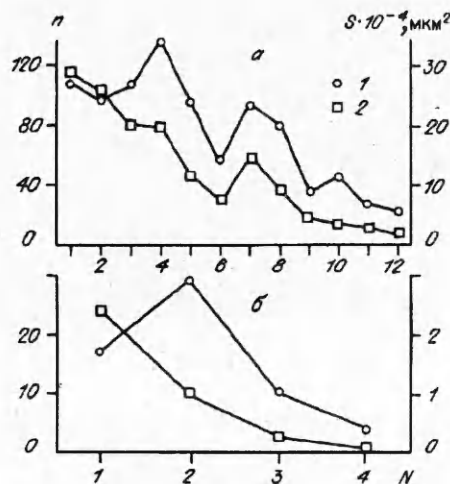


Рис. 6. Количество повреждений (1) и их суммарная площадь (2) по участкам в медном образце (а) и в медном покрытии (б).

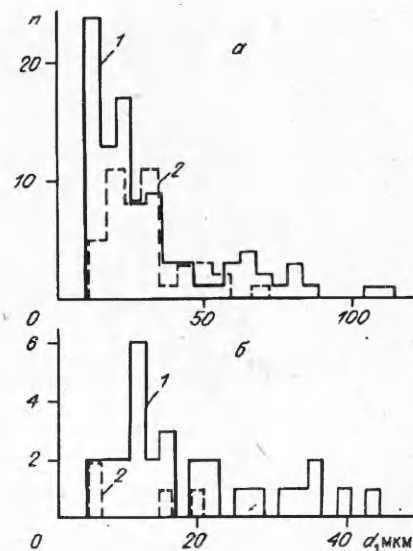


Рис. 7. Распределение повреждений по размерам для выбранных участков в медном образце (а: 1 — $N = 5$, 2 — $N = 10$) и в медном покрытии (б: 1 — $N = 2$, 2 — $N = 4$).

участке от интенсивности нагружения, которая условно характеризовалась номером участка N . Здесь $N = 1$ соответствует участку, прилегающему к месту макроразрушения. При N , большем приведенного на рис. 6, повреждений не наблюдается. Распределение повреждений по размерам показано на рис. 7. В качестве размера d используется средний диаметр наблюдаемого повреждения.

Для оценок критических условий начала отслоения покрытия и откольного разрушения материала подложки использовались результаты экспериментальных исследований затухания вызванных взрывом листового заряда ВВ ударных волн в преградах из стали и меди [5, 6] и расчетов воздействия скользящей детонации слоя ВВ на указанные преграды [7]. В работе [5] измерялись скорости тонких искусственных отколов при нагружении стальных пластин взрывом листового заряда ВВ с $\rho_c = 1,52 \text{ г/см}^3$ и $D_c = 7,52 \text{ км/с}$. В [6] манганиновым датчиком давления измеряли амплитуды ударно-волнового давления p в преградах из стали и меди при их нагружении взрывом листового заряда того же, что в данной работе, ВВ. Сведенные воедино результаты этих работ показаны на рис. 8, где h_i — толщина преграды в месте регистрации.

В результате выполненных в [7] численных расчетов воздействия скользящей детонации на преграды из стали и меди для удельного механического импульса, переданного преградам, получено одно и то же значение удельного импульса $I = 0,27 \rho_c D_c h_i$, что обусловлено фактическими одинаковыми значениями акустического импеданса этих материалов. В предположении, что форма нагружающего ударно-волнового импульса близка к треугольной, оценивалась его длительность: $\tau = 2 I / p$. Отражение нагружающего треугольного импульса от свободной поверхности рассматривалось в акустическом приближении. Сделаны оценки критического отрицательного давления в местах начала образования откола p_c и на границе раздела сталь — медь в местах начала отслоения покрытия p_c . Полученные результаты представлены в таблице.

Условия разрушения материалов при ударно-волновом нагружении вместе со значением критического отрицательного давления могут также характеризоваться значением градиента давления в растягивающем импульсе [8].

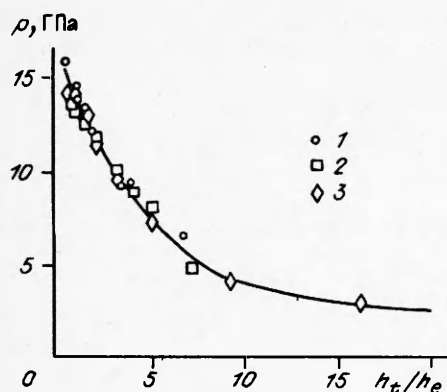


Рис. 8. Затухание амплитуды ударной волны в стали (1 — [5], 2 — [6]) и меди (3 — [6]).

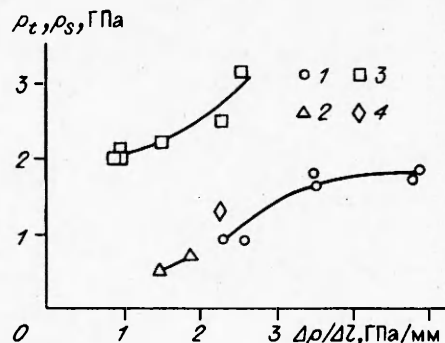


Рис. 9. Условия отслоения медного покрытия от стальной подложки (1 — разрушение медного слоя, 2 — разрушение по границе сталь — никель) и откола в стали (3) и меди (4).

В рассматриваемом случае этот градиент оценивали по формуле $\Delta p/\Delta l = 2p/c_0\tau$, где для объемной скорости звука c_0 в меди и стали брали значения 4,0 и 4,6 км/с соответственно. Полученные результаты по определению условий разрушения приведены на рис. 9 в виде зависимостей критического отрицательного давления в месте разрушения от градиента давления в растягивающем импульсе.

Таким образом, полученные результаты показывают, что используемый способ испытания образцов с покрытиями позволяет достаточно просто выявить влияние технологии нанесения покрытия на динамическую адгезионную прочность. Различие в адгезионной прочности при одинаковых условиях испытания сразу же отчетливо проявляется по длине отслоения покрытия l . Пример — отслоение покрытия в образцах 2 и 3 по границе раздела сталь — никель при более низких, чем при отслоении по меди, нагрузках. Поэтому целесообразно использовать способ, примененный в качестве сравнительного, позволяющего проводить экспресс-диагностику различных технологий нанесения покрытия.

Расчетные оценки условий разрушения позволили получить количественные данные по адгезионной прочности p , медного покрытия на стали, а также по откольной прочности p_t , используемых в качестве подложки стали и меди. Более того, последующая обработка этих данных — представление их в координатах $p_{t,s}, \Delta p/\Delta l$ — выявила явную тенденцию влияния формы, а следовательно, и длительности нагружающего импульса на реализуемые значения критического отрицательного давления. Если для откольной прочности металлов это наблюдалось ранее (см. [8] и последующие работы данного направления), то для динамической адгезионной прочности покрытий отмечено впервые.

Полученные результаты по откольной прочности низкоуглеродистой стали и меди достаточно хорошо согласуются с многочисленными результатами других авторов, собранными и систематизированными в работе [9]. Использование метода металлографического анализа дает возможность более точного определения координаты начала отслоения и откола и особенности этих процессов, а также характера предшествующего макроразрушению неполного разрушения образцов. В случае медного покрытия на стали обращает на себя внимание выявленное с помощью металлографического анализа многообразие механизмов отслоения, что может быть отчасти связано с неоднородностью качества нанесения покрытия.

Показательны также результаты по применению метода автоматизированного количественного анализа. По этому методу устанавливается количественная связь условий динамического нагружения со степенью реа-

лизующейся поврежденности материала. Полученные данные могут быть использованы для построения кинетических моделей разрушения (см. [10] и последующие работы данного направления), где прогресс несколько тормозится недостатком количественной информации по поврежденности материалов в условиях динамического ударно-волнового нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романченко В.И., Степанов Г.В., Астанин В.В. и др. Определение прочности соединений материалов при импульсном нагружении // Пробл. прочности. — 1977. — № 6. — С. 80—82.
2. Anderholm N.C., Goodman A. Method and apparatus for measuring adhesion of material bonds: Pat. 3605486 USA, IC G 01 N 3/30. — Publ. 20.09.1971.
3. Голубев В.К., Новиков С.А., Сеницына Л.М. Способ испытания материалов на разрыв: А.с. 864050 СССР, МКИ С 01 № 3/30. — Оpubл. 15.09.1981. Бюл. № 34.
4. Голубев В.К., Рабинович К.Г., Тукмаков В.П. и др. К определению динамической прочности гальванического медного покрытия на стали // Пробл. прочности. — 1992. — № 1. — С. 89—91.
5. Рыбаков А.П., Ментешов Е.В., Шавков В.П. Действие взрыва листового заряда ВВ на металлические пластины // ФГВ. — 1968. — 4, № 1. — С. 126—128.
6. Иванов А.Г., Огородников В.А., Тюнькин Е.С. и др. О зависимости удельной работы отрыва при отколе от интенсивности ударно-волнового нагружения // Докл. IV Всесоюз. совещания по детонации. — Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1988. — Т. 1. — С. 175—179.
7. Голубев В.К., Крысанов Ю.А., Новиков С.А. и др. О механическом нагружении преград скользкой детонацией тонкого слоя ВВ // ФГВ. — 1991. — 27, № 4. — С. 94—99.
8. Breed B.R., Mader C.L., Venable D. Technique for the determination of dynamic — tensile — strength characteristics // J. Appl. Phys. — 1967. — 38, N 8. — P. 3271—3275.
9. Голубев В.К. Прочность и разрушение материалов при интенсивных динамических нагрузках. Металлы и сплавы: Обзор. — М.: ЦНИИатоминформ, 1989. — 123 с.
10. Seaman L., Curran D.R., Shockey D.A. Computation models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. — 1976. — 47, N 11. — P. 4814—4826.

607200, Арзамас-16,
ВНИИЭФ

Поступила в редакцию
14/IX 1993

УДК 534.222.2

Д.И. Мацуков, В.С. Соловьев, С.В. Сорокин

О СТРУКТУРЕ ФРОНТА ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДЕТОНАЦИИ

Приводятся результаты экспериментов по регистрации процесса отражения детонационной волны в смеси нитрометана с ацетоном от прозрачного сапфирового окна. Показано, что при отражении остаются невзорвавшиеся области, несмотря на повышение температуры на 760—800 К и давления на 7,8 ГПа, а поперечное перемещение ярких областей прекращается. Полученные результаты находятся в противоречии с существующей схемой появления очагов реакции по механизму адиабатического теплового взрыва и требуют корректировки представлений о схеме пульсирующей детонации.

Представление о структуре фронта пульсирующей детонации дано в работах [1, 2] и связано с механизмом адиабатического теплового взрыва, приводящего к появлению очагов вследствие случайных причин, например флуктуаций температуры. Схема очага, заимствованная из [2], приведена на рис. 1.

Проведены эксперименты, результаты которых позволяют, в отличие от [1, 2], иначе взглянуть на структуру пульсирующей детонации. Схема экспериментов показана на рис. 2. Свечение детонационного фронта и продуктов реакции за ним до и после отражения детонационной волны (ДВ) от поверхности сапфирового окна наблюдали с помощью регистратора 8 с электронно-оптическим преобразователем, работающим как в режиме щелевой развертки в одних экспериментах, так и в режиме покадровой съемки в

© Д.И. Мацуков, В.С. Соловьев, С.В. Сорокин, 1994.