

УДК 581.1

К УПРОЧНЕНИЮ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ*Камалян Р. З.¹, Камалян С. Р.²***HARDENING OF METALS UNDER PULSE ACTION**

Kamalian R. Z., Kamalian S. R.

There is an analysis of the modern state of the theory of shock-wave hardening of metals. The results of experimental studies show influence of the thickness of an explosive, charge layouts and initiate on changes in the metal's geometrical shape dimensions and structure.

Keywords: hardening, shock-wave, deformation, hardness of grain, slip line, microstructure.

Механизм упрочнения металлов и сплавов, подвергнутых ударно-волновому нагружению, нельзя считать выясненным полностью. Среди параметров, определяющих эффект упрочнения, различные авторы называют величину давления во фронте ударной волны [1], величину деформации за фронтом, форму и длительность импульса сжатия, время нарастания давления [2] и другие. В [3] установлено определяющее влияние на эффект упрочнения остаточной деформации образца, которая дополняет ударно-волновое воздействие и может существенно изменить механические свойства обрабатываемых образцов и даже вызвать разупрочнение. На упрочнение влияет также способ ударно-волнового нагружения, например, подрыв контактного заряда или удар пластинкой, если образец находится в области нестационарного движения ударной волны [1].

Таким образом, на современном этапе исследований процесса ударно-волнового упрочнения трудно указать полный набор параметров ударного сжатия и характеристик материала, определяющих эффект упрочнения. Бесспорно лишь весьма общее утверждение, что величина упрочнения определя-

ется количеством искажений, остающихся в решетке после прохождения ударной волны.

Здесь важно отметить, что удельная энергия ударного сжатия E определяется соотношением [2]

$$E = (p + p_0)(V_0 - V) \approx p(V_0 + V). \quad (1)$$

В (1) p — давление на фронте ударной волны, которое, как правило, много больше исходного давления p_0 ; V_0 и V — соответственно начальный и конечный удельный объемы материала. Составными частями энергии E являются кинетическая и внутренняя энергии

$$E = E_k + E_{\text{вн}},$$

причем удельная кинетическая энергия определяется массовой скоростью u за фронтом

$$E_k = \frac{1}{2}u^2,$$

а внутренняя складывается из энергии холодного сжатия E_x , тепловой энергии E_T , и энергии дефектов E_d

$$E_{\text{вн}} = E_x + E_T + E_d.$$

Существенно, что E_d обязана входить в выражение для внутренней энергии в виде отдельного члена. Действительно, энергия холодного сжатия E_x зависит только от удельного

¹Камалян Рубен Завенович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой общей и прикладной математики Академии маркетинга и социально-информационных технологий; e-mail: kasarub@mail.ru.

²Камалян Самвел Рубенович, канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой математики и прикладной информатики Краснодарского филиала Российского государственного торгово-экономического университета, доцент кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: karuzav@mail.ru.

объема, а тепловая E_T является термодинамически равновесным вкладом. Поэтому для энергии дефектов необходимо вводить дополнительные предположения о ее зависимости от параметров ударного сжатия, которая еще недостаточно изучена.

Из имеющихся оценок [2] энергии дефектов видно, что традиционное пренебрежение величиной E_d при расчете ударно-волновых процессов оправданно. Заметим, что сложность определения E_d в значительной степени определяется ее малой величиной по сравнению с остальными видами энергий. Необходимо также отметить, что параметры, используемые в физике ударных волн [4], являются усредненными по физически бесконечно малому объему, включающему большое число атомов. Процесс дефектообразования происходит в значительно меньшем масштабе, характеризуемом межатомными расстояниями, где понятие давления теряет смысл.

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по определению механических характеристик различных материалов и сплавов после воздействия сильных ударных волн. Однако неизвестны какие-либо серьезные попытки обобщения имеющихся экспериментальных данных для построения единых зависимостей, связывающих параметры ударного сжатия и изменения остаточных свойств для материалов и сплавов, различных по кристаллической структуре и свойствам. Несомненно, что установление корреляции между остаточными характеристиками материалов после ударного сжатия, параметрами ударной волны и свойствами материалов является важной задачей. Если бы существовал большой набор зависимостей остаточных свойств от условий сжатия и можно было точно указать полный набор величин, определяющих процесс дефектообразования в ударной волне, то можно было бы воспользоваться анализом размерностей [5]. К сожалению, необходимые для такого подхода данные отсутствуют.

Настоящая работа является продолжением [6] и посвящена экспериментальному исследованию упрочнения металлов, представляющих собой быстро изнашиваемые детали машин и механизмов.

Широкому использованию взрывных методов обработки деталей машин и механизмов препятствует недостаточная изученность характеристик структуры и свойств

металлов и сплавов после нагружения по различным схемам и поведения их при последующих термообработках. Взрывное воздействие может приводить к образованию различного типа структур в зависимости от условий нагружения. Поэтому представляется важным установление связи между условиями взрывного нагружения и изменениями в структуре металлов, выявления факторов, определяющих свойства обработанного взрывом металла.

Одно из важнейших условий, отмеченное в [3], является наличие или отсутствие существенной остаточной деформации. Необходимо отличать обработку собственно ударной волной, когда образец или деталь практически не претерпевает формоизменения, от взрывного нагружения в условиях, когда оно сопровождается значительным пластическим течением. Поскольку случаи взрывного нагружения существенно отличаются происходящими физическими процессами, то и структура, а, следовательно, и свойства металлов, обработанных таким образом, также должны быть различны. Кроме того остаточные пластические деформации изменяют геометрические размеры упрочненных деталей настолько, что это выходит за поля допусков обрабатываемых размеров и приводит к браку.

Как показали исследования степень упрочнения деталей из стали 110Г13Л в основном зависит от толщины слоя взрывчатого вещества. Изменение толщины слоя ВВ от 3 мм до 12 мм приводит к увеличению поверхностной твердости с $HV=300$ до $HV=380$ (твердость по Брунеллю). В то же время увеличение толщины слоя ВВ приводит к значительным остаточным деформациям деталей. Поэтому была проведена серия экспериментов по определению влияния толщины ВВ, схем расположения заряда и инициирования на изменение геометрических размеров, формы, а также на изменение структуры металла деталей машин и механизмов. Упрочнению подвергали детали как прошедшие механическую обработку, так и необработанные. Вначале импульсному воздействию подвергали зубья венцов ведущих колес, не прошедших механической обработки. Взрывчатое вещество — гексопласт Г-75, раскатанное до необходимой толщины, наносили на поверхность зуба, предварительно смазанную слоем клея N88. Ширина полотна заряда, с учетом нависания на боковые

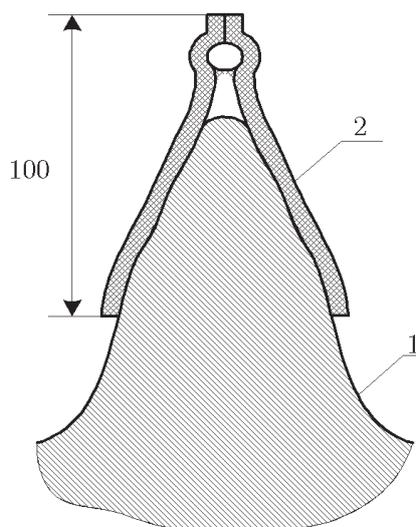


Рис. 1. Схема расположения заряда ВВ на поверхности зуба венца: 1 — зуб венца, 2 — заряд ВВ

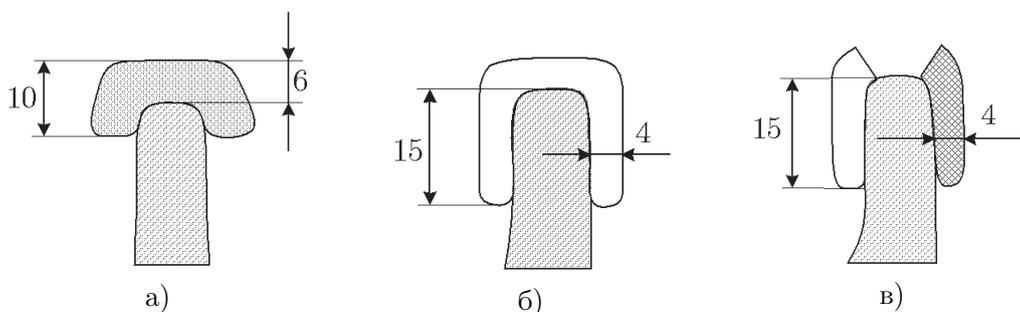


Рис. 2. Варианты расположения зарядов ВВ на поверхности грунтозацепов траков

поверхности, составила 42 мм. Схема расположения заряда представлена на рис. 1. Иницирование осуществляли с помощью электродетонаторов ЭД-8.

Для экспериментов были отобраны три венца, у которых два зуба оставлены в исходном состоянии, три упрочнены зарядами толщиной 3 мм, три зарядами — 5 мм, три зарядами — 7 мм и три зарядами 9 мм. При упрочнении поверхности ступицы заряд разбивали на четыре участка, иницирование каждого из которых осуществляли одновременно с помощью четырех отрезков детонирующего шнура (ДШ), на концах которых был выполнен усилитель-боевик из трех нитей ДШ. Таким способом были упрочнены ступицы четырех венцов, два из которых прошли предварительную механическую обработку. После упрочнения осуществляли соответствующие измерения параметров изделий.

Для макро- и микроструктурных исследований зубья отрезали от венца с помо-

щью установки автоматической воздушно-плазменной резки АВПР2, обеспечивающей зону термического воздействия для стали 110Г13Л в пределах 5–10 мм, а затем разрезали на образцы с помощью анодно-механической резки, обеспечивающей зону термического воздействия в пределах 0,1–0,2 мм. Обработку поверхностей образцов осуществляли по стандартным методикам. При микроструктурном анализе для металлографических исследований применяли прибор электрохимического травления Elypovist, позволяющий полностью исключать влияние механических воздействий на исследуемую поверхность при приготовлении шлифов. Металлографические исследования проводили на микроскопах МИМ-7 и ММР-3, микротвердость измеряли с помощью прибора ПМТ-3.

При упрочнении поверхностей грунтозацепов траков гусениц применяли, в зависимости от габарита сечения, три варианта схемы расположения зарядов ВВ (рис. 2).

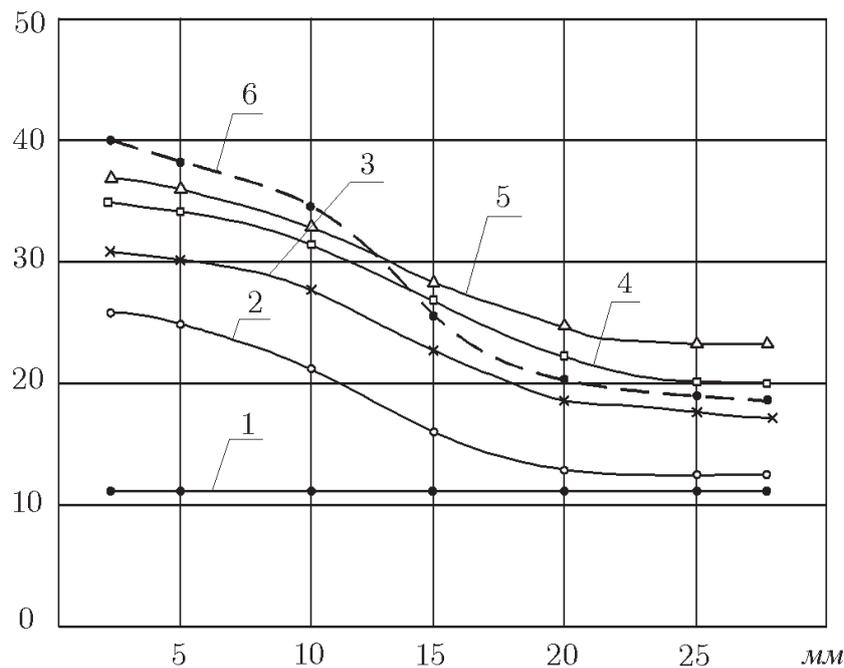


Рис. 3. Зависимость твердости зубьев от толщины заряда ВВ по глубине образца: 1 — без упрочнения; 2 — толщина заряда ВВ 3 мм; 3–5 мм; 4–6 мм; 5 — 7 мм; 6–9 мм (распределение твердости от вершины зуба)

По каждому варианту было упрочнено 10 траков. После упрочнения производили контроль размеров отверстий и их соосности. Образцы для исследования микро- и макроструктуры вырезали из венцов и траков до и после их упрочнения. Выявление микроструктуры проводили травлением шлифов в царской водке с последующей многократной переполировкой с травлением. Фотографирование структуры травленных шлифов осуществляли на микроскопе ММУ-3У4. Твердость измеряли по Роквеллу на приборе ТК-2.

Замеры зубьев венца до и после упрочнения их взрывом показали, что при упрочнении наблюдается значительная деформация, возрастающая с увеличением массы заряда. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке технологии промышленного упрочнения металлоизделий.

Качественно аналогичные результаты были получены также и при упрочнении грунтозацепов траков гусениц. Образцы для исследования микро- и макроструктуры вырезали из упрочненных венцов и траков, причем из образцов при вершине зуба готовили шлифы для исследования микроструктуры, а на образцах при основании зуба определяли твердость. Поперечные темплеты для определения твердости вырезали до и по-

сле упрочнения. Исходная твердость зуба венца составляет 11–13 HRC. Эксперименты подтвердили, что поверхностная твердость упрочненной стали 110Г13Л зависит от величины давления во фронте ударной волны и от длительности импульса. Твердость зуба с увеличением толщины слоя ВВ возрастает и на глубине 5 мм от поверхности при толщине слоя ВВ 3 мм составила 25–30 HRC, при толщине слоя ВВ 5 мм — 29–30 HRC, а при 9 мм — 35–36 HRC. Твердость зубьев в центральной части исходного металла, при толщине слоя ВВ 5 мм — 16 HRC, а при остальных режимах упрочнения твердость центральной части зубьев оставалось достаточно высокой, порядка 20–24 HRC. При толщине слоя ВВ 3 мм, твердость на глубине 5 мм возросла по сравнению с исходной в 2 раза, а при толщине заряда ВВ 5 мм — в 2,5 раза (рис. 3)

Аналогичные результаты по замерам твердости получены на образцах, вырезанных из крайних ушек и грунтозацепов упрочненных траков. Замеры твердости на приборе ТК — 2 по методу Роквелла показал, что твердость на глубине 2 мм от упрочненной поверхности на ушках составляет 30–31 HRC, а на грунтозацепах — 36–38 HRC. По мере удаления от поверхности твердость

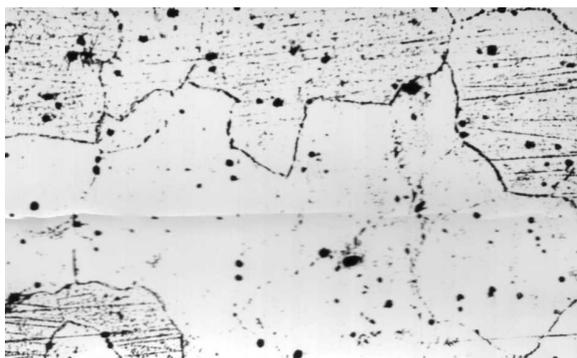


Рис. 4. Микроструктура образца из грунтозацепа трака до упрочнения. Черные пятна — неметаллические включения ($\times 160$)

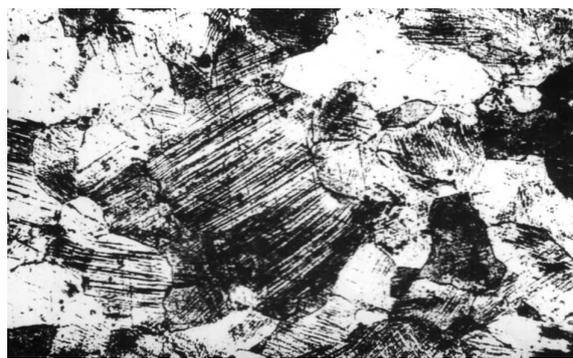


Рис. 5. Микроструктура образца из грунтозацепа трака после упрочнения слоем ВВ толщиной 4 мм на глубине 6 мм ($\times 160$)

падает и на расстоянии 10 мм составляет 20 HRC. При дальнейшем увеличении толщины заряда ВВ прирост твердости уменьшается.

Металлографические исследования структуры образцов, вырезанных из средней части зубьев венцов, показали, что микроструктура неупрочненного металла соответствует стали 110Г13Л в состоянии после литья и закалки. В структуре стали, упрочненной взрывом, на всех исследуемых режимах под микроскопом не обнаружено фазовых превращений, т.е. аустенит является устойчивым и упрочнение идет за счет скольжения и двойникования [1].

При упрочнении взрывом слоем ВВ толщиной 3 мм в структуре вблизи поверхности в зернах аустенита преобладает множественное скольжение, т.е. видимые параллельные линии скольжения идут в двух направлениях. По мере удаления от упрочняемой поверхности число таких зерен уменьшается, начинают преобладать зерна с линиями скольжения, идущими в одном направлении, далее появляются зерна без линий скольжения. В центральной части зуба структура аналогична исходной. С увеличением толщины слоя ВВ величина зоны с множественными искажениями увеличивается и при толщине слоя ВВ 9 мм зерна с множественными искажениями наблюдаются даже в центре зуба. Структура образцов, вырезанных из крайних ушек и грунтозацепов упрочненных траков, среднезернистая. В средней части шлифа образца, вырезанного из ушка, отмечается рыхлость, образовавшаяся в процессе кристаллизации при литье. Исходная структура всех исследованных траков — аустенит с неметаллическими включениями,

которые видны на шлифах в виде черных пятен (рис. 4).

После упрочнения взрывом при всех схемах и режимах аустенитные зерна приобретают множество линий скольжения и двойникования (рис. 5).

По мере удаления от упрочненной поверхности количество зерен с линиями скольжения уменьшается (рис. 6).

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением массы заряда ВВ твердость металла по глубине возрастает;
2. Взрывное упрочнение металлов сопровождается также и деформацией изделий, приводящей в ряде случаев к отклонению от допустимого размера до 4 мм и более;
3. Наиболее благоприятные условия при упрочнении венцов ведущих зубчатых колес и траков гусениц были созданы слоем пластического ВВ толщиной 3–5 мм.

Литература

1. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972. 188 с.
2. Дерibas Ч. А., Нестеренко В. Ф., Тесленко Т. С. Универсальная зависимость параметров упрочнения металлов от интенсивности ударно-волнового воздействия // ФГВ. 1982. № 6. С. 68–74.
3. Губарева Н. В., Соболенко Т. М., Тесленко Т. С. Зависимость структуры меди от деформации при взрывном нагружении // ФГВ. 1977. № 4. С. 636–640.
4. Станюкович К. П. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.
5. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1972. 440 с.

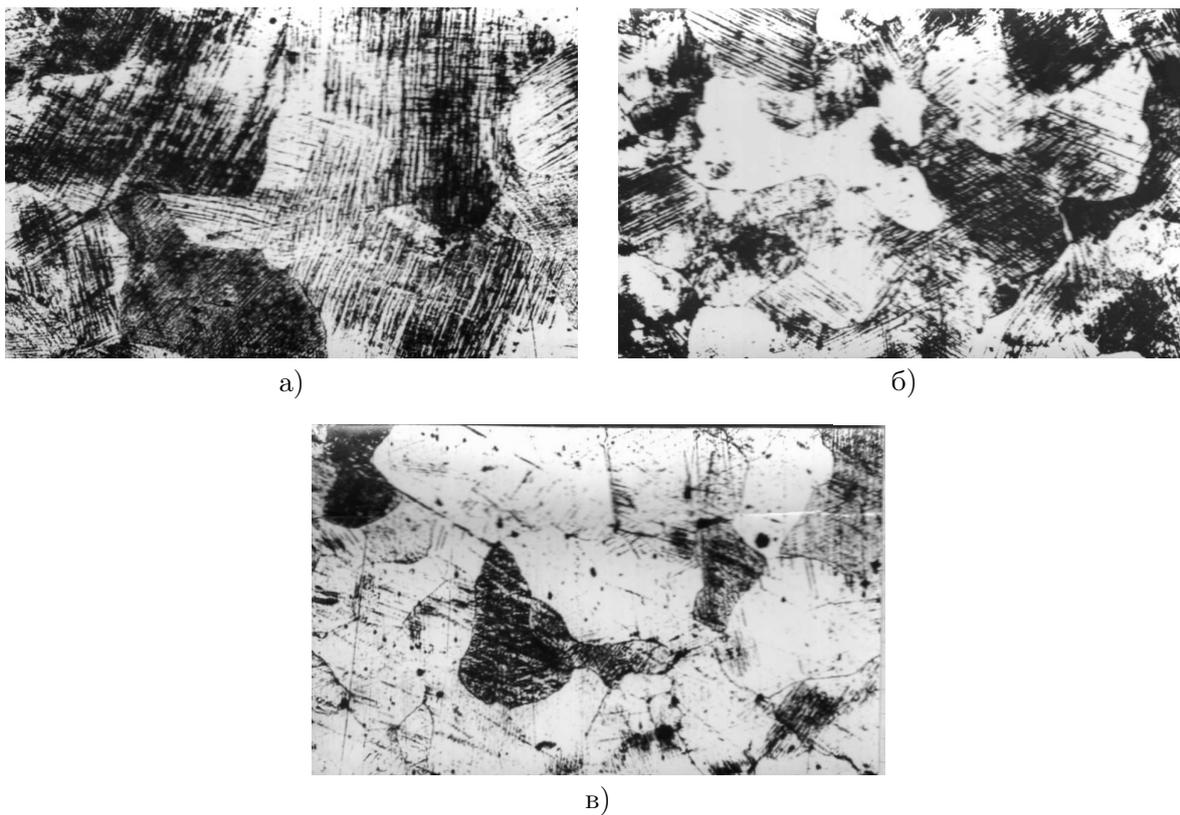


Рис. 6. Микроструктура образца из грунтозацепа трака, упрочненного накладным зарядом ВВ толщиной 6 мм ($\times 160$) на глубине от поверхности: а) 3 мм; б) 6 мм; в) 9 мм

6. Камалян Р.З., Фердман Я.И. О некоторых результатах упрочнения металлов взрывом //

Известия вузов. Сев.-Кавказ. регион. Технические науки. 1993. № 3-4. С. 54-57.

Ключевые слова: упрочнение, ударная волна, деформация, твердость зерна, линии скольжения, микроструктура.

Статья поступила 29 июня 2011 г.

Академия маркетинга и социально-информационных технологий, г. Краснодар

Краснодарский филиал Российского государственного торгово-экономического университета, г. Краснодар

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

© Камалян Р.З., Камалян С.Р., 2011