

УДАРНОЕ СЖАТИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Т. М. Соболенко
(Новосибирск)

Армко-железо и малоуглеродистые стали наиболее часто применяются в исследованиях, выполняемых для выявления различных закономерностей при импульсном нагружении металла [1—9].

В опытах образцы малоуглеродистой стали Ст. 3 размерами $30 \times 30 \times 10$ мм нагружались плоской ударной волной по схеме I (рис. 1), где нет защиты боковых поверхностей от действия разгрузки.

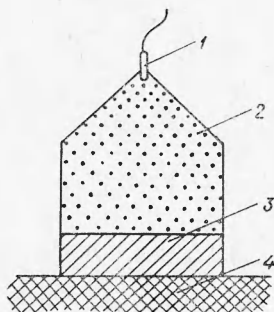


Рис. 1. Схема I нагружения стали плоской ударной волной.

1 — детонатор; 2 — ВВ; 3 — образец; 4 — рыхлое основание.

Использовались следующие ВВ при одинаковых высотах слоя (20 мм): аммонит 6ЖВ, гексоген и ТГ 50/50. Образец, нагруженный взрывом аммонита, не имел никаких разрушений. По образцу, нагруженному гексогеном, при разгрузке от боковых свободных поверхностей пошли трещины под углом 45° , однако центр образца видимых разрушений не имел. Общая осадка материала составила около 1 мм ($7 \div 10\%$). Плоская волна ТГ 50/50 оказала максимальное разрушающее действие, произошел откол по трещинам, образовавшимся при разгрузке от боковых граней, центр образца также имел трещины.

При рассмотрении микроструктур центральных сечений образцов обнаружено, что структура стали Ст. 3 под действием взрывной волны нагрузки претерпевает весьма существенные изменения. При нагружении стали плоской ударной волной (взрыв аммонита), когда при отражении детонационной волны от поверхности развивается давление около 100 кбар, в структуре феррита наблюдается двойникование (рис. 2). Двойникование проявляется четко, однако не во всех зернах. Кроме основных линий двойников в зернах часто выявляются более тонкие и слабее проявленные полосы, идущие под некоторым углом ($30 \div 60^\circ$) к основному двойнику. На расстоянии 3—4 мм от поверхности взрыва двойникование происходит в весьма малом количестве зерен. На таком же расстоянии практически исчезает упрочнение, которое составляло 1,15—1,25 от исходного. Это, вероятно, связано с диссипацией энергии ударной волны при прохождении через образец. Ослабленная волна нагрузки при отражении от свободной поверхности дает резкий подъем твердости на 0,2—0,5 мм.

При инициировании гексогена на поверхности образца Ст. 3, где давление в пике ударной волны, возбуждаемой в металле, достигает около 210 кбар, на расстоянии $1 \div 0,8$ мм от поверхности в структуре при

обычном увеличении невозможно выделить отдельного двойника. Видны зерна, где феррит имеет разные оттенки травления. Ближе к сердцевине структура становится подобной структуре стали, нагруженной аммонитом (рис. 2). При увеличении в 1200 раз несколько проявляется строение зоны у поверхности. На рис. 3 видно, что между основными двойниками прошло дополнительное искажение структуры. Микротвердость на расстоянии 1 мм оказывается увеличенной в 1,55 раза, остальное сечение упрочнено равномерно до 1,15—1,2 раза. Влияние свободной поверхности проявляется так же, как и для случая нагружения аммонитом.

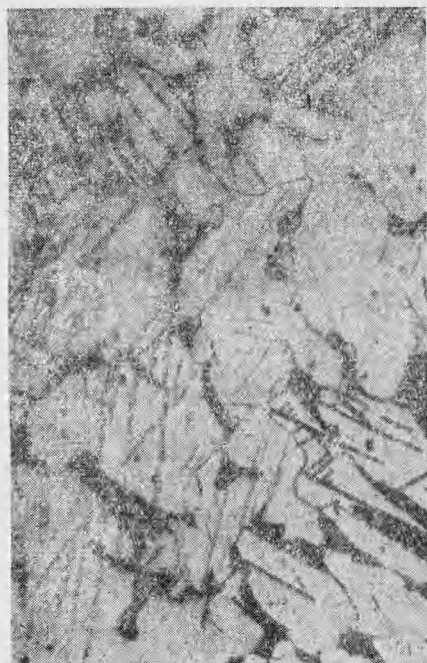


Рис. 2. Сталь Ст. 3 после нагружения аммонитом; $\times 320$.

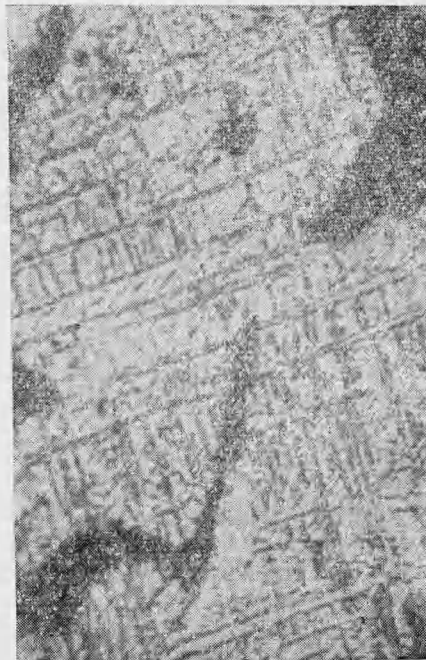


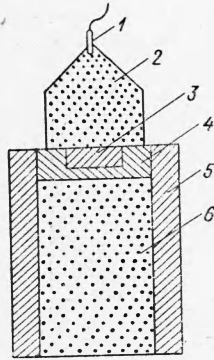
Рис. 3. Сталь Ст. 3 после нагружения гексогеном у поверхности; $\times 1200$.

В осколках образца, нагруженного детонацией ТГ 50/50, где давление в пике ударной волны, возбуждаемой в металле, составляет около 410 кбар, у поверхности взрыва структура при обычных увеличениях проявляется плохо. При большем увеличении выявляется множественно искаженная тонкая структура, подобная представленной на рис. 3. Как и в случае гексогена, через 1—1,1 мм от поверхности взрыва появляются зерна феррита, не имеющие в структуре четкого множественного искажения. В зоне множественного искажения микротвердость весьма велика и составляет около 1,65 от исходной.

Примерно одинаковая глубина множественного искажения структуры, полученная в двух различных случаях, зависит либо от свойств материала — диссипации энергии в металле, либо от времени прихода разгрузки от поверхности, так как оба заряда разных ВВ были одинаковы на высоте. Для выяснения вопроса о влиянии разгрузки на видимые в оптический микроскоп структурные изменения были поставлены дополнительные опыты.

Дополнительные опыты по нагружению стали Ст. 3 плоскими ударными волнами проводились по схеме II (рис. 4). Металлический

образец диаметром 30 мм заливался сплавом Вуда (плотность 9 г/см^3 , $c_0 = 3,6 \text{ км/сек}$) заподлицо с краями толстостенной трубы $\varnothing 80 \text{ мм}$, высотой $\sim 200 \text{ мм}$. Сплав Вуда заливался так, чтобы заполнить пространство до внутренней поверхности поддерживающей трубы, т. е. на $h_0 + 2 \text{ мм}$ образца. Остальная часть трубы засыпалась землей, которая действовала как замедлитель при метании образца, подобно рыхлому основанию в случае работы по схеме I. Заряд ВВ имел генератор плоской волны, диаметр рабочей части составлял 40 мм.



Сталь, взятая для этих опытов из прутка $\varnothing 30 \text{ мм}$, оказалась более мягкой, чем использованная в предыдущих опытах. Перлит располагался строчно и параллельно падению ударного фронта. (В предыдущих опытах перлит был расположен хаотично по границам зерен феррита.)

Рис. 4. Схема II нагружения стали плоской ударной волной. 1 — детонатор; 2 — ВВ; 3 — образец; 4 — сплав Вуда; 5 — поддерживающая труба; 6 — земляная засыпка.

В опытах использованы заряды аммонита 6ЖВ, высотой 20 и 120 мм, и гексогена, высотой 5, 30, 60 и 120 мм.

После нагружения образцов взрывом по схеме II существенного изменения их внешнего вида не обнаружено. Осадка образцов составила не более 5%.

При рассмотрении результатов упрочнения выявлено, что в случае нагружения малоуглеродистой стали плоской ударной волной при взрыве аммонита 6ЖВ повышение микротвердости составляет 1,2—1,5 от исходной величины. Твердость от поверхности по сечению образцов толщиной 5 мм при увеличении толщины слоя ВВ в 6 раз практически не изменялась (рис. 5), хотя при слое аммонита 120 мм наблюдались более часто попадавшие значения твердости на верхнем пределе разброса. Как и в случае опытов без боковой поддержки, твердость несколько увеличивается на тыльной поверхности за счет разгрузки, но значительно слабее. В случае нагружения гексогеном, кроме упрочнения по всему сечению образцов в 1,2—1,5 раза, имеет место увеличение твердости от поверхности нагружения в 1,8 раза по сравнению с исходной. Глубина распространения этого упрочнения зависит от высоты заряда. При малой высоте заряда (5 мм) глубина максимального упрочнения составляла 0,2 мм. Надо отметить, что здесь общее упрочнение составляло всего 1,1 раза на глубину до 5 мм, а затем стало выше — до 1,2 раза, что можно объяснить проявлением повышения твердости при отражении ударной волны от тыльной свободной поверхности. При высоте заряда

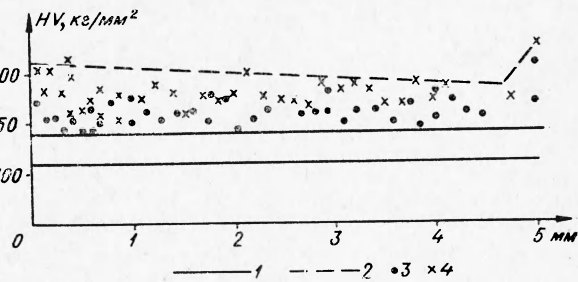


Рис. 5. График зависимости твердости стали Ст. 3 от расстояния до поверхности нагружения аммонитом.

1 — область разброса значений микротвердости по сечению исходной стали; 2 — область разброса значений микротвердости по сечению стали, нагруженной аммонитом; 3 — высота ВВ 20 мм; 4 — высота ВВ 120 мм.

в 30 мм упрочнение в 1,8 раза распространилось уже на 1,1—1,2 мм. Общее упрочнение сквозное и значение его ближе к верхнему пределу разброса. Наблюдается увеличение твердости у тыльной поверхности.

Увеличение высоты заряда гексогена до 60 мм привело к упрочнению в 1,8 раза на глубину до 2,5 мм от поверхности, а при заряде 120 мм глубина максимального упрочнения составила 3 мм, т. е. практически не увеличилась (рис. 6). Этого следовало ожидать, поскольку существует так называемая «активная часть» заряда, оказывающая непосредственное влияние на образец, подвергаемый сжатию. При увеличении толщины слоя ВВ больше определенного предела влияние ВВ на упрочняемый образец прекращается. Эффект увеличения твердости на свободной поверхности в двух последних случаях не обнаружен.

Природа явления резкого увеличения твердости на свободной поверхности на 0,2—0,5 мм при соотношении толщины пластины и высоты заряда 1 : 1, 1 : 2 и не более 1 : 3 не очень ясна, но, по-видимому, связана с формой ударной волны в металле.

Из полученных результатов видно, что упрочнение, полученное при взрывном нагружении, существенно зависит от исходного состояния материала: чем выше твердость взятого материала, тем меньше упрочнение он получит при нагружении определенным ВВ (т. е. определенным давлением в пике ударной волны). Так, если в случае горячекатаной листовой стали аммонит упрочняет металл в 1,15—1,2 раза, то при применении более мягкой отожженной прутковой стали в 1,2—1,5 раза, а гексоген — в первом случае в 1,6 раза, во втором — в 1,8 раза.

Изучение микроструктур показало, что обычно в зернах феррита обнаруживаются двойники, возникшие в результате взрывного нагружения. Однако, если при нагружении взрывом аммонита (слой 20 мм) довольно густой сеткой двойников занята вся плоскость сечения образца толщиной 5 мм, то при нагружении слоем 120 мм двойникование развито значительно слабее, и первые линии двойников образуются лишь на расстоянии 0,7—1 мм от поверхности нагружения. При этом поле без двойников по структуре не отличается от исходного материала, хотя повышение его твердости значительно и не уступает твердости материала, имеющего двойники. В работе [5] показано, что при давлениях выше 130 кбар даже в зернах, в которых, несмотря на увеличенную твердость, не проявляется структура деформации, при низкотемпературном отжиге структура должна проявиться в виде системы двойников. В нашем случае этого не наблюдалось, так как давления, генерируемые аммонитом в железе, не превышали 100 кбар. Микроструктуры образцов, нагруженных гексогеном, показывают отчетливое множественное искажение структуры, природа которого дискутируется [5—11] в слоях, соответствующих увеличению твердости до 1,8 по сравнению с исходной. Количество двойников в зернах остального сечения для случая заряда гексогена 5 мм мало и увеличивается только к противоположной взрыву поверхности образца, а для высоты заряда гексогена 30 мм по всей толщине образца, не захваченной множественным искажением, наблюдается относительно равномерное распределение двойников.

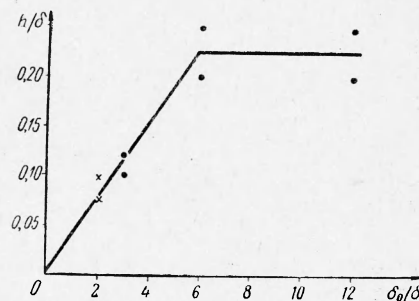


Рис. 6. График зависимости глубины упрочнения от толщины слоя ВВ. (h — глубина упрочнения, δ — толщина образца, δ_0 — толщина слоя ВВ).

Из анализов полученных результатов можно сделать вывод, что двойникование феррита, по крайней мере для давлений ниже фазового перехода, происходит не в зоне сжатия при прохождении ударных волн от поверхности нагружения, а зависит от характера разгрузки. Сделанный вывод подтверждается тем, что в случае нагружения образца ударной волной от взрыва 20 мм аммонита и 30 мм гексогена время разлета продуктов детонации, а значит и время действия импульса по порядку величины, сравнимо со временем прохождения ударной волны сжатия через образец, и проходящая разгрузка приводит к полному снятию напряжения в материале, а градиент скоростей создает растяжение, которое и является существенным при двойниковании. В случае нагружения образца толщиной 5 мм взрывом аммонита слоем 120 мм время разлета продуктов значительно возрастает, и в то время, как волна разгрузки подходит к области материала, где существует высокое давление, градиент скорости оказывается недостаточным, чтобы произвести двойникование.

На множественное искажение структуры влияет высокое давление, которое развивается в волне сжатия. Увеличение слоя ВВ, снижающее эффект действия разгрузки, не привело к исчезновению или хотя бы частичному ослаблению видимого под микроскопом «множественного искажения» структуры зерен. Наоборот, с увеличением высоты слоя гексогена увеличивается глубина проникновения в образец слоя «множественного искажения», поэтому естественным объяснением этому эффекту можно считать фазовый переход, осуществляющийся во время существования высоких давлений.

Опытами, проведенными по схеме II, показано, что двойникование стали происходит при прохождении волны разгрузки за счет существования резкого градиента скоростей в материале, что противоречит утверждению работы [4], где без убедительных, как нам кажется, доводов сделано предположение о возникновении двойников в ферритных зернах стали в зоне сжатия, хотя в этой же работе для меди показано возникновение двойникования в процессе разгрузки. Разницу в глубине распространения двойникования и упрочнения в образце Ст. 3 толщиной 10 мм, нагружавшемся по схеме I (глубина упрочнения 3—4 мм), и толщиной 5 мм, нагружавшемся по схеме II (упрочнение сквозное при одном и том же заряде аммонита 20 мм), можно объяснить, по-видимому, различием в расстоянии от поверхности нагружения тыльной стороны. В первом случае двойникование при разгрузке идет, в основном, за счет остановки материала в поверхностном слое при разлете продуктов взрыва. Сжатие и скорость полета остального материала за счет диссипации энергии ударной волны при прохождении через материал оказываются малыми и не могут привести к достаточному градиенту скоростей на оставшихся 5—6 мм пластины для образования двойников. Возможно, ощутимую добавку к рассеиванию энергии при прохождении через металл вносит хаотическое расположение перлита в сталях, использованных для нагружения по схеме I. Во втором случае из-за меньшей общей толщины пластины и более «удачного» для ударной волны расположения перлита имеем сквозное двойникование и более равномерное упрочнение. Таким образом, можно сделать вывод, что упрочнение складывается как бы из двух составляющих: 1) при сжатии в ударной волне; 2) при разгрузке за счет растяжения частиц материала при создании градиента их скоростей.

Рассматривая полученные результаты, можно видеть, что численная величина упрочнения в волне сжатия зависит от давления, существовавшего в ударной волне при прохождении через данную точку образца

(опыт с аммонитом $\delta_0=20$ мм и $\delta_0=120$ мм при пластине 5 мм толщины). Упрочнение же в волне разгрузки весьма существенно при отражении от свободной поверхности пластины. Влияние разгрузки на оптическую картину, наблюдаемую в стали Ст. 3, можно значительно уменьшить или вообще исключить, изменяя высоту заряда или толщину защитных пластин (или самого образца).

Глубины упрочнения от гексогена ($\delta_0=20$ мм) по схеме I и по схеме II ($\delta_0=30$ мм) оказались практически укладывающимися в схему увеличения глубины упрочнения с увеличением высоты заряда (см. рис. 6). Таким образом, в выбранных условиях схемы испытания I и II мало влияют на результаты упрочнения. Более существенна толщина пластины, так как именно от нее зависит, произойдет ли в ударной волне при прохождении через сечение значительное снижение давления, которое приведет к уменьшению или даже к практическому исчезновению упрочнения. Для достаточно сильных ударных волн (200 кбар и более) схема нагружения I и II становится существенной только из-за возникающих разрушений образца и эта проблема, а не упрочнение как таковое, встает на первый план в реальном случае.

Поступила в редакцию
25/III 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Альтшулер, Д. М. Тарасов, М. П. Сперанская. ФММ, 1962, 13, 5, 738.
2. Э. С. Атрощенко, П. О. Пашков, И. М. Рядинская. ФММ, 1965, 19, 4, 619.
3. Э. С. Атрощенко, П. О. Пашков, И. М. Рядинская. ФММ, 1965, 19, 5, 797.
4. Э. С. Атрощенко, П. О. Пашков, И. М. Рядинская. ФММ, 1965, 19, 6, 923.
5. Э. С. Атрощенко, П. О. Пашков, И. М. Рядинская. ФММ, 1966, 21, 1.
6. Дж. С. Райнхарт, Дж. Пирсон. Поведение металлов при импульсивных нагружениях. ИЛ, 1958.
7. C. S. Smith. Trans. Met. AIME, 1958, 212, 10, 574.
8. D. Bancroft, E. Peterson, S. Minchall. IAP, 1956, 27, 291.
9. P. C. Jonson, B. A. Stein, R. S. Davis. J. Appl. Phys., 1962, 332, 557.
10. T. Takenashi, W. A. Basset. Science, 1964, 145, 3631, 35.
11. G. E. Dieter. Strengthening mechanisms in solids, 1960, 279.