

**УПРОЧНЕНИЕ ВЗРЫВОМ
ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ**

*А. А. Дерибас,
Ф. И. Матвеевков, Т. М. Соболенко
(Новосибирск)*

В настоящее время при обработке металлов все шире применяются импульсивные методы и, в частности, методы, использующие энергию взрывчатых веществ. Взрыв используется для упрочнения, штамповки, очистки поверхностей металлических изделий, ведутся широкие исследования по сварке взрывом.

Сейчас, когда усложняются режимы эксплуатации изделий, упрочнение взрывом для некоторых случаев практики является почти единственным выходом. Так, согласно данным, доложенным представителями концерна Дюпон на Международной конференции в Лондоне в апреле 1962 г.: «Несмотря на отдельные отрицательные стороны упрочнения взрывом, проблема увеличения срока службы крестовин настолько драматична, что 12 основных железных дорог США используют данную схему (взрыв) для упрочнения железнодорожных стрелочных крестовин» [1].

Институтом гидродинамики СО АН СССР аналогичные работы начаты в 1960 г. совместно с Новосибирским стрелочным заводом. Предварительные результаты экспериментов опубликованы в работе [2].

Одним из важных свойств высокомарганцевистой стали, применяемой для изготовления стрелочных переводов, является способность ее к значительному упрочнению в процессе деформации. По данным исследовательского центра компании Гадфильда, высокомарганцевистая сталь при идентичных условиях деформации имеет максимальную способность к упрочнению по сравнению с другими марками стали [3, 4].

В наших опытах образцы высокомарганцевистой стали нагружались взрывом так, чтобы через образец прошла ударная волна, вызываемая детонацией ВВ, лежащего непосредственно на поверхности образца. При взрыве бризантного взрывчатого вещества в среде, взаимодействующей с зарядом, распространяется ударная волна. Эта волна представляет собой скачкообразное изменение плотности и давления в среде, распространяющееся со сверхзвуковой скоростью относительно скорости звука в невозмущенной среде. При распространении по среде ударная волна затухает, т. е. происходит рассеивание ее энергии и, следовательно, уменьшение перепада плотности и давления. На некотором расстоянии от заряда ударная волна превращается в упругую волну сжатия, распространяющуюся со скоростью звука (звуковая волна). Сама детонация ВВ представляет собой процесс прохождения по взрывчатому веществу детонационной волны с постоянной скоростью, характерной для данного ВВ (скорость детонаций) (табл. 1). За фронтом этой волны ВВ сгорает, превращаясь в газообразные продукты взрыва.

Известно, что при падении детонационной волны по нормали к абсолютно жесткой поверхности давление на фронте удваивается. Этот случай осуществляется одновременным подрывом всей верхней плоской

Таблица 1

Взрывчатые вещества	Толщина ВВ, мм	ρ_0 , г/см ³	D , км/сек	p , кбар
Аммонит 6 ЖВ	25, 45 и выше	1,0	3,8 4,0	60
Насыпной гексоген	От 10	1,1	6,2	120
ТГ 50/50	От 3	1,6	7,6	210

поверхности заряда ВВ. В этом случае детонационная волна перейдет в ударную волну сжатия, и со скоростью, близкой к скорости звука в металле, распространится по образцу. Дойдя до свободной поверхности и частично затухнув, волна отражается в виде волны разряжения.

В металле возникают растягивающие напряжения, которые при достаточно интенсивных волнах могут привести к отколу слоя металла, что в наших опытах действительно наблюдалось для случаев нагружения образца без защиты от действия ВВ гексогеном (небольшие боковые отколы) и особенно литым ТГ 50/50 (разрушение образца размером $30 \times 30 \times 20$ мм на отдельные осколки).

Как показали металлографические исследования поперечных сечений образцов (рис. 1, 2), аммонит, который при плоской ударной волне возбуждает в металле давление с пиком около 100 кбар, производит де-

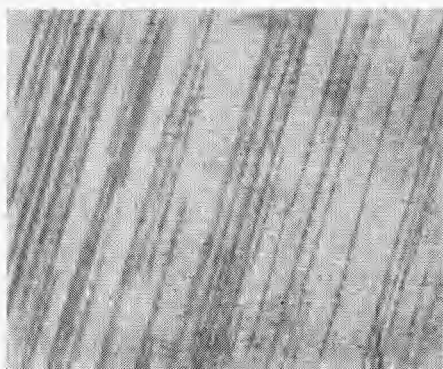


Рис. 1. Сталь Г13Л, нагруженная взрывом аммонита. $\times 1200$.

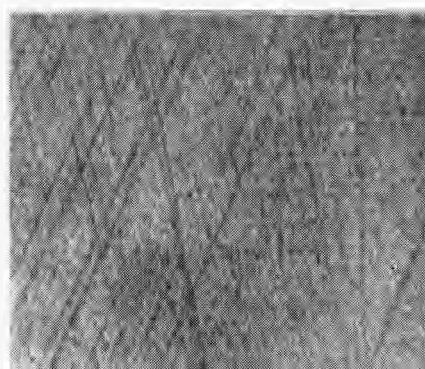


Рис. 2. Г13Л, нагруженная взрывом гексогена. $\times 1200$.

формацию с хорошо различимыми линиями внутри зерен; гексоген, инициирующий в металле давление с пиком около 240 кбар, и ТГ 50/50, возбуждающий давление около 420 кбар, дают более тонкую структуру деформированного материала. Однако во всех случаях ударного нагружения размеры и форма зерен остались практически без изменения. Если в случае аммонита при увеличении 1200 хорошо видны достаточно широкие полосы и практически свободное от видимой деформации пространство между ними, то при нагружении 240 кбар, а тем более 420 кбар деформация распределена более равномерно, идет по нескольким пересекающимся плоскостям и захватывает практически все наблю-

даемое поле. Рис. 2 дает картину, подобную приведенной в статье [4] для давлений свыше 260 кбар.

Замеры микротвердости образцов производились на микроскопе «Эпитип-2», снабженном специальной приставкой с алмазной пирамидкой. Микротвердость исследуемой стали от исходной $Hv=270-290 \text{ кг/мм}^2$ увеличилась при применении в качестве ВВ аммонита до $330-360 \text{ кг/мм}^2$, гексогена — до $420-450 \text{ кг/мм}^2$ и ТГ 50/50 — до $500-580 \text{ кг/мм}^2$. Таким образом, значительно упрочняется высокомарганцовистая сталь при использовании либо ТГ 50/50, которое, однако, производит слишком сильные разрушения материала, либо гексогена.

На рис. 3 изображен случай, когда детонационная волна распространяется по ВВ вдоль поверхности образца. При этом ударная волна входит в металл в точке пересечения поверхности металла и детонационной волны, и эта точка движется по металлу со скоростью детонации. За счет диссипации энергии при прохождении в глубь металла скорость ударной волны падает, и фронт ее изгибается, т. е. формируется косая ударная волна. Пик давления в этом случае имеет величину в 1,5—2 раза меньшую, чем в случае плоской ударной волны, падающей из ВВ по нормали к поверхности металла, но глубина проникновения значительно больше. После разлета продуктов детонации происходит разгрузка упрочняемой поверхности. В результате взаимодействия волн сжатия и растяжения (ударная волна и волна разгрузки) вблизи поверхности возникает весьма неравномерное поле значительных напряжений, которые могут привести к разрушению металла. На образование этого поля напряжений существенно влияют также волны разгрузки, отражающиеся от боковых поверхностей.

В процессе исследований было опробовано несколько схем упрочнения взрывом с использованием косой волны:

1. Нанесение ВВ непосредственно на поверхность. Это привело в случае насыпного гексогена к небольшому повышению твердости на глубину 10—15 мм. Однако, на поверхности отмечались отдельные трещины. Применение в этой схеме ТГ 50/50 приводило к разрушению поверхности образца.

2. Нанесение ВВ на защитный слой (огнеупорная глина 1—2 мм). При этом по сравнению с первой схемой резко падали твердость и глубина упрочнения. Поверхность оставалась частично разрушенной.

3. На металл, покрытый защитным слоем, метается пластина. При этом твердость поверхности поднималась до 430 HV , но сколы с боковых поверхностей образцов и трещины оставались существенными. На результаты упрочнения по этой схеме резко влияет качество обработки поверхности. (Шлифование поверхности резко уменьшает вероятность образования трещин).

4. Было замечено, что трещины всегда направлены параллельно боковым граням образцов. Поэтому для борьбы с трещинами необходимо было создать в упрочняемом слое условия, подобные всестороннему сжатию (рис. 4). На

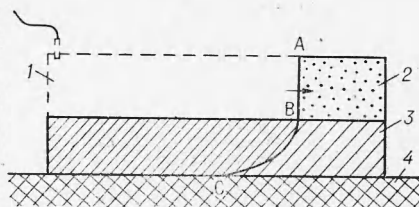


Рис. 3. AB — детонационная волна, BC — ударная волна.

1 — сдетонировавшее ВВ; 2 — недетонировавшее ВВ; 3 — упрочняемый материал; 4 — металлическое основание.

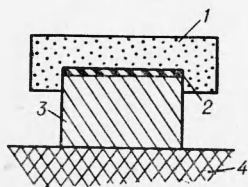


Рис. 4. Схема упрочнения.

1 — заряд ВВ с записанием; 2 — слой пластичного инертного материала; 3 — упрочняемый образец; 4 — основание.

образец с защитным слоем на поверхности, а затем и без него, устанавливался заряд, несколько охватывающий боковые грани образца. Замечено, что в случае плотного прилегания ВВ к поверхности трещины не образовывались даже в отсутствие защитного слоя при большой высоте заряда. Защитный слой нужен только для того, чтобы исключить случайные воздушные прослойки, которые вызывают неравномерность ударной нагрузки. Работы проводились с насыпным тексогеном и литым

Таблица 2

Высота заряда ТГ 50/50, мм	Средняя твердость поверхности упрочнения, НВ	Осадка образца, мм	Глубина упрочнения, мм	Качество поверхности после взрыва	Расположен. повышенной твердости по сечению, мм	Твердость упрочнен. участка сечения, НВ
5	302—321	0,5—1	20—25	Трещин нет	3—7	302
10	302—321	1	27—30	То же	6—18	341—321 (302)
15	302—341 (375)	2	35—40	„	8—25	341—321 (302)
5×3	340—380 (415)	2	Сквозное (50)	Сколы по боковым граням	—	—
20	302—341	3	Сквозное (50)	Трещин нет	10—40	375—331 (375—302)

ТГ 50/50 (табл. 2), который по характеристикам наиболее близок к пластическим ВВ. В схеме 4 значительно уменьшена вероятность расщепления поверхности. Существенным является также и то обстоятельство, что наибольшая твердость при упрочнении по этой схеме достигается не на поверхности, как в других рассмотренных схемах, а на некоторой глубине под упрочняемой поверхностью. Этот факт является весьма положительным, так как после упрочнения деталь обычно проходит последующую механическую обработку, и поверхностный слой металла снимается.

В опытах по схеме 4 варьировались высота и конфигурация зарядов, количество нагружений, способ инициирования, а также проверялось влияние металлургических и технологических условий изготовления образцов на результаты упрочнения. После нагружения производились замеры твердости по Бринеллю на поверхности образцов после снятия некоторого слоя во время зачистки литой поверхности и замеры распределения твердости по глубине на темплетах поперечных сечений образцов по Роквеллу. Для контроля отливалась плавка с прибылями, поверхности образцов из нее фрезеровались, но твердость поверхности практически не изменилась. ТГ 50/50 разной толщины производит примерно одинаковое упрочнение поверхности образцов, хотя при увеличении заряда несколько уменьшается предельный разброс значений твердости. В зависимости от высоты слоя ВВ образцы имели различную осадку, глубину упрочнения и смещения зоны повышенной твердости от поверхности. Явление смещения зоны повышенной твердости на некоторое расстояние от поверхности можно объяснить взаимодействием нагрузки ВВ и волн разгрузки, идущих от свободных поверхностей образ-

цов или внутренних пор и рыхлот. При этом взаимодействии увеличивается скорость частиц металла, происходит большая деформация, приводящая к некоторому увеличению твердости. Механические характеристики высокомарганцовистой стали после упрочнения различными способами приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика сердечников	Механические свойства					
	σ_B , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	S_5 , %	ψ , %	a_K , кг/см ²	$\sigma_{ист}$, кг/мм ²
Неупрочненный металл . . .	62,1	41,46	18,26	16,45	16,7	75,6
Упрочненный металл*						
<i>HV</i> — 436; <i>H</i> — 13,5 мм . . .	79,1	68,5	6,9	8,3	7,4	87,1
Разность	+17,1	+27,04	-11,36	-8,15	-9,3	+12,5
Неупрочненный металл . . .	62,9	42,1	19,5	17,5	13,7	76,0
Упрочненный металл**						
<i>HV</i> — 500; <i>H</i> — 13 мм . . .	70,1	53,9	15,6	16,2	11,2	84,7
Разность	+7,2	+11,8	-3,9	-1,3	-2,5	+18,7
Неупрочненный металл . . .	61,0	46,6	15,3	20,6	17,2	77,0
Упрочненный металл***						
<i>HV</i> — 400; <i>H</i> — 30 мм . . .	100,0	90,2	8,0	13,6	9,6	115,7
Разность	+39,0	+43,6	-7,3	-7,0	-7,6	+38,7

* Упрочнение при эксплуатации.

** Упрочнение накаткой роликом.

*** Упрочнение взрывной волной.

Было проведено исследование микроструктур и микротвердостей образцов высокомарганцовистой стали, упрочненных криволинейной ударной волной в сравнении с образцом после накатки роликом. Рассматривались поперечные и продольные послойные сечения образцов. Микротвердость, замеренная на поверхностях послойных сечений, дана в табл. 4. Интересно отметить, что после взрывного нагружения ТГ 50/50 разной толщины микротвердость металла ни в одной точке образцов толщиной 50 мм не оказалась равной исходной, в то время, как после накатки роликом уже через 5—7 мм от поверхности металл имеет исходную микротвердость. Структура поверхности накатки, имеющая максимальную

Таблица 4*

Расстояние поверхности, мм	Способ упрочнения			
	роликом	ТГ 50/50		
		20 мм	15 мм	10 мм
0,3—1	680—370	540	540	540
5	270	477	455	455
8	277	455	392	320
14	277	463	475	350
17	286	455	436	346
23	277	519 (трещ.)	408	344
26	271	483	385	396
33	280	487	362	392
36	286	455	400	350
42	277	540 (трещ.)	350	350
45	277	392	400	350
50	540	588	520	408

* Исходная твердость 270—295 *HV*.

микротвердость 680 кг/мм^2 , имеет волокнистый характер; на расстоянии 1—2 мм от поверхности хорошо различимы полосы деформации, идущие через отдельные зерна, а на расстоянии 4—5 мм видны только отдельные редкие линии двойников, а затем и совершенно недеформированная структура стали Г13Л (рис. 5, а, б).



Рис. 5. Сталь Г13Л у поверхности (а) и на расстоянии 4 мм от поверхности (б) после наката роликом. $\times 1200$.

Проявление деформации металла Г13Л после взрывного нагружения выглядит отлично от медленной деформации роликом, особенно в самых верхних слоях. Если при упрочнении роликом по количеству полос и общему искажению структуры можно примерно предсказать твердость в данном месте, то в случае взрывной деформации между твердостью и числом линий деформации, наблюдаемых при обычных увеличениях, нет точного согласования. На структуре, снятой у поверхности образца, нагруженного взрывом ТГ 50/50 или гексогена со значительной высотой слоя, практически не наблюдается полос деформации при увеличении 60. Только при увеличении 1200 несколько проявляется структура этого участка (рис. 6). Здесь прохождение деформации у поверхности подобно случаю с плоской волной, когда деформация проходит по нескольким возможным направлениям в кристаллах. Далее, когда давление в пике ударной волны падает, а ее фронт становится шире, деформация



Рис. 6. Сталь Г13Л у поверхности, нагруженная взрывом ТГ 50/50. $\times 1260$.

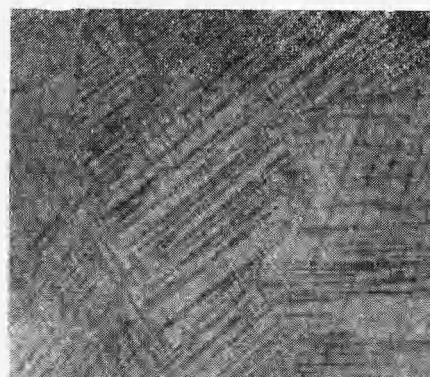


Рис. 7. Сталь Г13Л на расстоянии 21 мм от поверхности, нагруженная взрывом ТГ 50/50. $\times 1200$.

проходит по меньшему количеству возможных направлений в кристалле (рис. 7). Однако глубина проникновения этой деформации намного превосходит глубину обычных деформаций. Так, нагружение образца взрывом ТГ 50/50 толщиной 10 мм дает видимую под микроскопом полосчатость до 30 мм, а ниже в зернах она выявляется слабо. В случае нагружения образца толщиной 50 мм взрывом ТГ 50/50 20 мм он будет иметь полосчатую структуру зерен на расстоянии 1—2 мм от поверхности и по всему сечению. Эти факты согласуются с замерами твердости по Роквеллу и микротвердо-

стей на сечениях образцов. Исследованная схема 4 была применена для упрочнения сердечников железнодорожных стрелочных крестовин типа Р-65.

В процессе эксплуатации сердечник под действием динамических нагрузок работает на смятие и истирание (рис. 8). При смятии происходит постепенное упрочнение металла за счет его деформации, а после смятия поверхность сердечника работает только на истирание. Таким образом, к моменту максимального упрочнения сердечник уменьшается по высоте примерно на величину деформации металла при смятии. Эта величина (порядка 2—3 мм) соизмерима с величиной максимально допустимого износа (6 мм). На рис. 8 отчетливо видно, что в процессе смятия (начальный участок кривой 1) уменьшение высоты сердечника происходит значительно быстрее, чем при истирании. Идея предварительного упрочнения сердечника состоит в том, чтобы, исключив зону смятия, подвергать сердечник в работе только истиранию. Тогда характер износа сердечника будет соответствовать кривой 2 (см. рис. 8) и срок его службы увеличится в несколько раз.

При упрочнении сердечников необходимо сохранить геометрические размеры изделия, имеющего достаточно сложную конфигурацию (рис. 9). Вследствие этого нельзя упрочнять яблоко и усовики одним зарядом, накрывающим всю поверхность сердечника, поскольку происходит образование глубоких трещин в желобах. Поэтому для упрочнения одного сердечника приходилось применять три отдельных заряда — два на усовики и один на яблоко. Заряды на усовиках должны подрываться одновременно, в противном случае подрыв одного заряда приведет к изгибу яблока в сторону другого усовика. Таким образом, для упрочнения одного сердечника необходимы два взрыва: на усовиках и на яблоке. Последовательность этих взрывов существенной роли не играет.

При использовании схемы 4 величину зависания заряда нужно было подбирать из условия сохранения ширины желоба, так как увеличение зависания заряда со стороны желоба приводило к раздутию последнего. Поэтому при упрочнении по этой схеме заряды на усовиках имели несимметричное зависание; большая величина зависания была на внешних гранях усовиков, а зависание внутри желоба было значительно меньше.

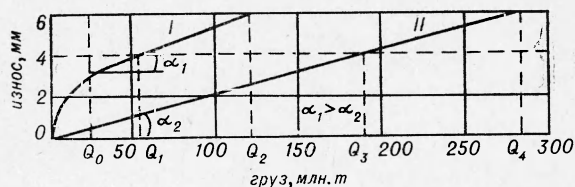


Рис. 8. График износа крестовин в зависимости от пропущенной нагрузки.

1 — неупрочненная крестовина; 2 — упрочненная крестовина.

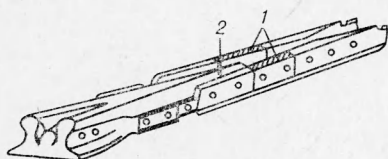


Рис. 9. Общий вид сердечника железнодорожной стрелочной крестовины типа Р-65 (заштрихованы места упрочнения). 1 — усовики; 2 — яблоко.

При взрыве в сердечнике возникают настолько высокие напряжения, что, кроме локальной деформации, в местах упрочнения иногда возникают остаточные деформации, всего изделия. Поэтому приходилось после упрочнения в ряде случаев прибегать к правке изделия. Для того чтобы избежать этого отрицательного явления, необходимо прежде всего обеспечить прилегание сердечника к жесткому массивному основанию или производить упрочнение одновременно двух сердечников, обуславливая тем самым симметричное нагружение изделий при взрыве.

Поступающие сведения констатируют повышение срока службы упрочненных взрывом крестовин, по крайней мере, в 1,5—2 раза.

*Поступила в редакцию
12/III 1966*

ЛИТЕРАТУРА

1. *A. H. Holtzman & C. G. Rudershauser*. Recent advances in metal working with explosives. Sheet Metal Industries, June, 1962.
2. *Е. И. Биченков, А. А. Дерибас, Ю. А. Тришин*. Об упрочнении металлов при помощи взрыва (на примере стали Г13Л). Сб. Уч. Сов. по народнохозяйственному использованию взрыва, вып. № 22, 1962.
3. Марганцовистая сталь. Под ред. М. Е. Блантера. М., Металлургиздат, 1959.
4. *A. H. Holtzman & G. R. Cowan*. Response of Metals to High Velocity Deformation. Vol. 9. Interscience publishers, New York—London, 1960.