

происходит дальнейшее развитие трещин и зачатков трещин, образованных при первом прохождении волны растяжения, что приводит к образованию новых и к дальнейшему дроблению ранее образованных откольных кусков. При этом происходит смыкание и размыкание трещин, волны сжатия переходят из одного куска в другой, от соударения кусков образуются новые волны сжатия.

Доля разрушений, вызванных волной, отраженной от нагружаемого конца стержня, довольно велика в общем объеме разрушений.

В условиях проведенных экспериментов разрушений от действия волны при втором ее отражении от нагружаемого конца не наблюдалось.

А. Н. Ханукаев определяет суммарную длину оторвавшихся кусков равной половине эффективной части волны сжатия.

Как показали данные проведенных экспериментов, суммарная длина оторвавшихся кусков больше общей длины волны и во много раз больше эффективной части волны. Число оторвавшихся кусков А. Н. Ханукаев определяет кратным от деления величины максимальных растягивающих напряжений на величину предела прочности отрыву. Но, как показали данные проведенных экспериментов, максимально возможное значение растягивающих напряжений в стержнях из органического стекла не превышает 1600 кг/см^2 , минимальное значение предела прочности отрыву равно $1300 \div 1400 \text{ кг/см}^2$, т. е. отношение этих величин не может быть большим 1, 2.

Число оторвавшихся кусков, как видно из сказанного выше, зависит от большого числа факторов. Если же иметь в виду только параметры волны напряжений, то следует сказать, что число возникших при прохождении волны напряжений трещин зависит от максимума волны, конечная же длина каждой возникшей трещины зависит от длительности волны напряжений.

Поступила 16 IV 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. Госгортехиздат, 1962.
2. Ханукаев А. Н. Исследование механизма разрушения стержней под действием ударной волны с помощью скоростной киносъемки. Усп. научн. фотографии, 1959, № 4.
3. Griffith A. A. The theory of rupture. Proc. 1-st Intern. Congr. Appl. Mech. Delft, 1924.
4. Мачинский М. В. Теория расчета зарядов. Взрывное дело, 1936, № 27, 8.

УПРОЧЕНИЕ СТАЛИ ПРИ КУМУЛЯТИВНОМ ВЗРЫВЕ

Л. И. Миркин, Н. П. Новиков

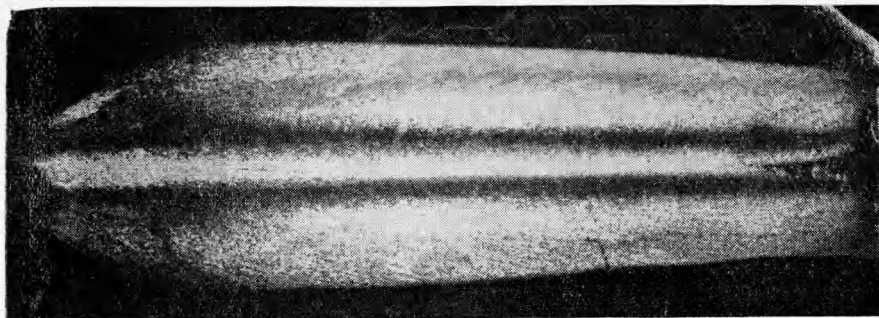
(Москва)

Многочисленными исследованиями установлено, что импульсная деформация металлов приводит к повышению их прочностных характеристик. Так, по данным [1] при взаимодействии металлических пластинок, сталкивающихся с преградой со скоростями $200\text{—}300 \text{ м/сек}$, наблюдается упрочение металла, а увеличение скорости до 3300 м/сек приводит к возрастанию эффекта упрочения [2]. Рассмотрение ударных волн, возникающих в пластинках при ударе, позволяет определить параметры металла при сверхвысоких давлениях [3]. Согласно этим расчетам при высокоскоростных взаимодействиях давление в металлических пластинках резко возрастает, что, вероятно, и приводит к упрочению. Гидродинамическое рассмотрение сходящихся цилиндрических волн показывает, что, используя такие волны, можно получать еще более высокие параметры в сжатом металле. Так, например, при высокоскоростном (3250 м/сек) соударении пластины, обжатой взрывом, с тонкостенной трубой возникает цилиндрическая, сходящаяся к оси трубки ударная волна, что приводит к дальнейшему упрочению материала [4] по сравнению с эффектами упрочения в [2]. Одним из способов получения очень больших давлений при сжатии является кумуляция. Как известно [5], в результате кумулятивного взрыва образуется кумулятивная струя, распространяющаяся с большой скоростью и определяющая пробивание преграды и пест, в котором сосредоточена основная масса материала облицовки, всесторонне обжатой продуктами взрыва.

В данной работе изучались результаты обжатия облицовки кумулятивной выемки и связанные с ним структурные изменения материала песта.

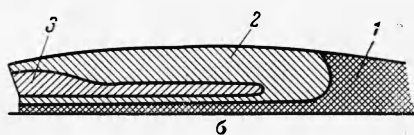
Эксперименты проводились с зарядами бризантного взрывчатого вещества типа ТГ50/50. Диаметр зарядов равнялся 76 мм , высота составляла 240 мм , угол конусности кумулятивной выемки — 30° . Облицовка кумулятивной выемки изготавливалась из стали — 10, толщина облицовки равнялась 2.5 мм . Иницирование заряда производилось с торца, противоположного кумулятивной выемке.

В результате подрыва образовывались кумулятивная струя и пест. Изучался пест, который улавливался после взрыва при помощи песочного демпфера, что устраняло дополнительное влияние взаимодействия с преградой песта, летящего со скоростью 300 м/сек, и возникающее вследствие этого дополнительное упрочнение. Пест разрезался по диаметру вдоль оси, полировался, после чего на него наносилась сетка, измерялось распределение твердости по Виккерсу и одновременно проводилось фотографирование поверхности песта с различным увеличением. На фиг. 1 приведена фотография сечения песта, обработанного специальным травлением, на которой видны характерное место отрыва кумулятивной струи и разрыхление вдоль оси песта.



Фиг. 1

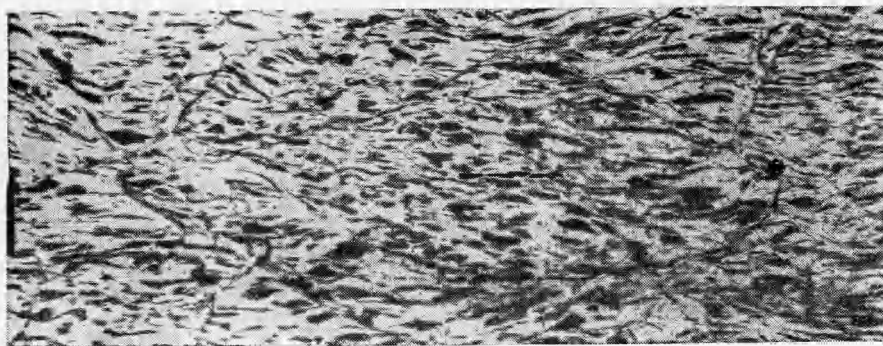
По результатам измерения твердости строились изосклеры (кривые равной твердости), по которым затем наносились контуры областей с твердостью, лежащей в определенных интервалах. Приближенная форма этих областей для случая, когда все результаты измерения твердости делились на три интервала, показана на фиг. 2. Из графика видно, что, наряду с областями 1, твердость которых не превышает 250 кг/мм², в образце имеются участки 2 с твердостью до 350 кг/мм² и область 3 с твердостью до 400 кг/мм². Для сравнения укажем, что максимальная твердость стали того же типа при упрочнении в результате соударения пластин при относительных скоростях 3300 м/сек не превышала 250 кг/мм² [2], а при дополнительном образовании сходящейся цилиндрической волны твердость доходила до 350 кг/мм² [4]. Металлографическое исследование показало, что при небольшом увеличении (70 раз) все области песта имеют одинаковую структуру, состоящую из вытянутых зерен, характеризующих очень большие пластические деформации и течение материала, связанное с перемешиванием отдельных слоев (фиг. 3). При больших увеличениях (450 раз) видно, что в областях с повышенной твердостью (области 3 на фиг. 2) зерна феррита содержат много двойников (фиг. 4), а в областях с меньшей твердостью (области 1 на фиг. 2) большие вытянутые зерна феррита состоят из мелких равноосных зерен (фиг. 5).



Фиг. 2

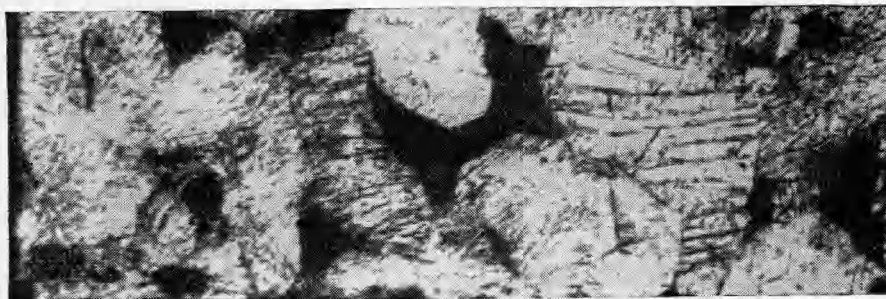
При анализе причин наблюдаемого упрочнения и рассмотрения эффектов повышенной твердости вдоль образца прежде всего необходимо провести анализ процессов, происходящих во время образования песта. Рассмотрим гидродинамические процессы образования струй. В обычно используемой теории кумуляции [5,6] предполагается, что под действием продуктов взрыва бризантного ВВ (давление $\sim 10^5$ атм) металл облицовки находится в таком состоянии, когда его можно рассматривать как несжимаемую жидкость. Далее, на основании геометрического рассмотрения струй, образованных при сжатии облицовки, определяются скорости и массы песта и струи. Схема такого процесса образования кумулятивной струи показана на фиг. 6, где AN — пест, NL — кумулятивная струя, $ABEK$ — активная масса заряда, AMK — исходное положение облицовки; 2 — график распределения активной массы заряда на единицу поверхности облицовки. Однако возможен несколько иной подход, который был предложен в [7] при изучении высокоскоростных кумулятивных струй, где физические процессы, имеющие место при кумуляции, выступают более отчетливо. Образование кумулятивных струй в этом случае можно рассматривать как истечение сильно сжатого взрывом металла облицовки в атмосферу. При этом, зная состояние металла в сжатой облицовке кумулятивной выемки, можно определить скорость струи и состояние материала в ней.

Состояние материала в сжатой облицовке определяется, с одной стороны, энергией, затраченной на сжатие данного участка облицовки, с другой — взаимодействием волн сжатия и разрежения, возникающих в процессе обжатия металла облицовки. Расчет активной массы заряда (m_A) (на фиг. 6 масса заряда в объеме, обозначенном

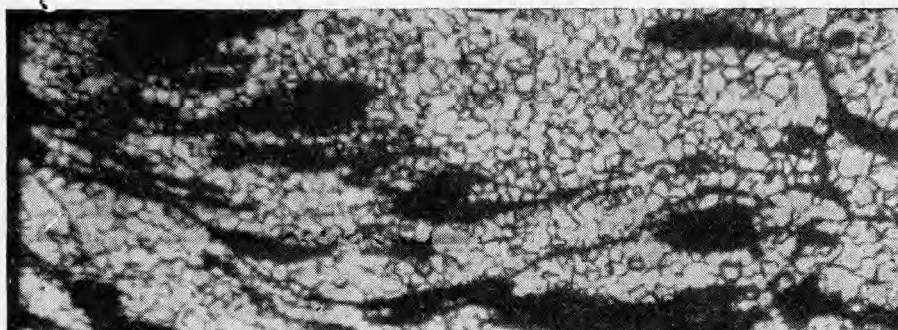


Фиг. 3

буквами *АВЕК*) способом, предложенным в [5], показывает, что величина ее на единицу поверхности облицовки, как графически изображено на фиг. 6, убывает от вершины конуса к основанию, и, следовательно, энергия обжатия облицовки также умень-



Фиг. 4



Фиг. 5

шается. Изучение процесса захлопывания облицовки кумулятивной выемки показывает, что вслед за сжимающейся облицовкой по продуктам взрыва бризантного ВВ движется волна разрежения, которая, нагоняя поверхность облицовки, уменьшает давление продуктов взрыва, движущих облицовку, и по самому металлу облицовки распространяется волна разрежения, которая приводит к уменьшению давления в облицовке. Используя значения скорости движения облицовки и скорости звука

в продуктах взрыва [5], определялось положение сечения, где волны разрежения догоняют облицовку и имеют место указанные выше эффекты (на фиг. 6 и 2 это место обозначено буквой G). Таким образом, уменьшение активной массы заряда и взаимодействие волн разрежения приводят к ослаблению воздействия взрыва и уменьшению давления в сжимающемся металле в направлении основания кумулятивной выемки.

После смыкания облицовки дальнейшее изменение состояния металла в ней определяется процессом цилиндрического обжатия, в результате которого давление и температура в металле возрастают вдоль радиуса к оси [8]. Можно предположить, что металл сжатой облицовки в районе оси будет вести себя как жидкость. Происходит истечение сильно сжатого металла в атмосферу (кумулятивная струя), давление на



Фиг. 6

оси падает, а вдоль радиуса к периферии распространяется волна разрежения. Зная степень сжатия подобно [7], можно было бы оценить состояние металла в полностью сжатой облицовке и более подробно рассмотреть процессы разгрузки. В настоящей работе ограничимся лишь качественным описанием процесса. Описанная качественная картина гидродинамических процессов подтверждается металлографическими исследованиями. Из анализа микроструктуры металла можно сделать заключение, что металл подвергался действию высоких давлений и температур. Действительно, из картины вытянутых зерен (фиг. 3) видно, что весь материал песта подвергался «турбулентному» течению в твердом состоянии, т. е. происходило не равномерное вытягивание зерен в каком-либо одном направлении, характерное, например, для течения при сжатии между пуансонами, а сложные процессы перемещения и деформации материала во многих направлениях. В то же время распределение (или время действия) температур в песте резко неравномерно. В областях с высокой твердостью, по-видимому, происходила высокоскоростная деформация, не сопровождающаяся существенным повышением температуры. Двойниковая структура феррита, наблюдаемая в этих областях, характерна для деформации с высокой скоростью. В областях с более низкой твердостью происходили, по-видимому, два последовательных процесса: интенсивная деформация и быстрый нагрев. На существование второго процесса указывает то, что каждое крупное зерно феррита разбито на мелкие равноосные зерна, характерные для структуры рекристаллизации обработки (см. фиг. 5). Отметим в заключение, что аналогичные структуры наблюдались при повышении скоростей соударения до 4000 м/сек, когда у поверхности кратера, образующегося при соударении, возникали рекристаллизованные зерна. Следует также отметить, что абсолютные величины твердости стали, полученные в данной работе, выше, чем полученные ранее при импульсных деформациях, что, вероятно, связано с более полным соблюдением всестороннего обжатия материала. По-видимому, дислокации, образующиеся при пластической деформации, не имеют возможности выйти на поверхности раздела, и в металле возникает повышенная плотность дислокаций, приводящая к высокому упрочению без остаточных фазовых переходов.

Авторы благодарят Б. И. Шехтера и И. М. Грязнова за интерес к работе и обсуждение результатов и Т. М. Аверьянову за помощь при проведении экспериментов.

Поступила 24 V 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Райнхарт Дж., Пирсон Дж. Поведение металлов при импульсивных нагрузках. Изд. иностр. лит. 1958.
2. Миркин Л. И. Рентгеноструктурное исследование импульсивной деформации малоуглеродистой стали. Физика металлов и металловедение. 1966.
3. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. Усп. физ. наук, 1965, 85, № 2, 197.
4. Козорезов К. И., Миркин Л. И. Упрочение металлов при кумуляции ударных волн. Докл. АН СССР, 1966.
5. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. Физматгиз, 1959.
6. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принципы его работы. Успехи матем. наук 1957, 12, № 4, 41.
7. Новиков Н. П. О высокоскоростных кумулятивных струях. ПМТФ, 1962, № 6, 22.
8. Станюкович К. П. Неустойчивое движение сплошной среды. Гос. изд. тех. теор. лит. Москва, 1955.