

118. С. Зенер, J. H. Hollomon. J. Appl. Phys., 1944, 15, 22.
119. Ю. В. Суворова. ПМТФ, 1968, 3, 55.
120. Ю. Н. Работнов, Ю. В. Суворова. ПММ, 1971, 35, 20.
121. Р. Г. Дэвис, С. Л. Мэйджи. Тр. амер. об-ва инж.-механиков. Сер. Д., № 2, 58, 1975.
122. А. П. Большаков, С. А. Новиков и др. ПМТФ, 1975, 1, 184.
123. С. А. Новиков, В. А. Сеницын. Проблемы прочности, 1976, 12, 104.
124. А. М. Косевич. УФН, 1974, 114, 509.
125. М. Корнфельд. Упругость и прочность жидкости. М., ГИТТЛ, 1951.
126. С. П. Козырев, К. К. Шальнев. Докл. АН СССР, 1970, 192, 552.
127. Б. М. Ровинский, В. М. Синайский, М. Я. Гальперин. ФММ, 1966, 21, 929.
128. С. А. Новиков, Ю. С. Соболев и др. Проблемы прочности, 1977, 3, 96.
129. Г. П. Черепанов. Механика хрупкого разрушения. М., «Наука», 1974.
130. В. А. Рыжанский, В. Н. Минеев и др. Механика полимеров, 1978, 2, 283.
131. В. Вейс и С. Юкава.— В сб.: Прикладные вопросы вязкости разрушения. Т. 25. М., «Мир», 1968.
132. Л. Д. Воловец, Н. А. Златин, Г. С. Пугачев. Письма в ЖТФ, 1978, 4, 451.
133. Л. Д. Воловец, Н. А. Златин, Г. С. Пугачев. Письма в ЖТФ, 1978, 4, 1079.
134. Ю. И. Фадеенко. ФГВ, 1967, 3, 2, 276.

ВЗРЫВНОЕ УПРОЧНЕНИЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

*Е. И. Богдановская, Л. В. Дубнов,
К. И. Красиков, К. К. Шведов*

(Черноголовка)

Исследование особенностей взрывного упрочнения металлов показывает, что механические свойства упрочненных материалов тесным образом связаны с параметрами взрывного нагружения [1—4]. Поэтому для выбора и обработки оптимального с точки зрения данного материала состава ВВ важно установить корреляцию между основными детонационными характеристиками и механическими свойствами упрочненного металла.

В [5] подобные исследования проводились на стали 1Х18Н10Т. Показано, что пластифицированные ВВ, содержащие в составе порошок тяжелого металла, обеспечивают большее упрочнение стали в скользящей и падающей детонационных волнах при меньших давлениях детонации по сравнению с мощными пластифицированными неметаллизированными ВВ.

Данная работа продолжает начатые в [5] исследования. Изучалось влияние процентного содержания и свойств некоторых тяжелых добавок на детонационные характеристики и механические свойства упрочненных сталей 1Х18Н10Т и Г13Л. Изучались модельные ВВ на основе гексогена и водной желатины в качестве пластификатора (состава Г-50, Г-60, цифры — массовое содержание гексогена в процентах) и ВВ на той же основе, содержащие 20% водной желатины и в качестве утяжелителей — сернистый барий и окись железа (составы Г+BaSO₄ (40, 30, 10), Г+Fe₂O₃ (30, 10), цифры — массовое содержание добавки в процентах).

Кроме того, исследованы составы для упрочнения: семтекс-1А и семтекс-1Н (ЧССР). Для построения зависимостей использовались также данные по параметрам детонации, полученные в [5]. Параметры детонации определялись электромагнитным методом в зарядах плоской формы толщиной 20 мм.

Наименование ВВ	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	$u_{ж}$, км/с	$p_{ж}$, кбар	p_c , кбар	n
Семтекс-1А	1,50	7,45	1,50	168	140	4,0
Семтекс-1Н	1,48	7,40	1,55	170	143	3,8
Состав Г+BaSO ₄ (30)	1,90	6,85	1,25	163	125	4,5
Состав Г+BaSO ₄ (40)	2,15	6,20	1,17	156	—	4,3
Состав Г+BaSO ₄ (10)	1,70	7,00	1,50	178	—	3,7
Состав Г+Fe ₂ O ₃ (30)	1,77	6,80	1,20	145	118	4,7
Состав Г+Fe ₂ O ₃ (10)	1,70	7,00	1,53	182	—	3,6
Состав Г-50	1,53	6,50	1,39	138	115	3,7
Состав Г-60	1,56	6,96	1,44	156	126	3,8
Гексоген	1,44	7,53	1,80	195	—	3,1
Гексопласт-89	1,59	7,65	1,53	187	148,5	4,0
Состав № 1	1,45	7,70	1,52	169	136,5	4,0
Пластит 805	1,62	7,63	1,56	191	152	4,0
Пластит Г-75	1,56	7,69	1,56	187	150	3,9
Состав № 5	1,45	7,35	1,43	154	126	4,1
Состав * В-10	1,60	7,20	1,45	175	134	4,3
Состав * В-30	2,06	6,90	1,19	169	127	4,8
Состав * В-40	2,33	6,76	1,13	178	128	5,0

* — Составы содержат 10, 30 и 40% W соответственно.

В таблице приведены параметры детонации исследованных ВВ: начальная плотность зарядов ρ_0 , скорость детонации D , массовая скорость продуктов взрыва (ПВ) $u_{ж}$, давление детонации $p_{ж}$, показатель политропы ПВ n , давление на границе раздела металл — ПВ при скользящей детонации p_c . (Техника экспериментов по определению параметров детонации и расчета p_c описана в [5].) В таблице приведены также данные для индивидуального гексогена и других смесевых систем из [5], которые используются в дальнейшем при обсуждении результатов.

На рис. 1 показана зависимость показателя политропы ПВ от процентного содержания инертной добавки в составах типа гексоген — инертный пластификатор — тяжелая добавка и в составах аналогичного типа, не содержащих тяжелой добавки. Кривая 1 построена только на основе данных по составам гексоген-пластификатор (водная желатина, высокополимеры) без тяжелых добавок. Кривая 2 построена на основе данных для тройных систем — гексоген — пластификатор — вольфрам. Отдельными точками нанесены данные для систем гексоген — пластификатор — тяжелая добавка (BaSO₄, Fe₂O₃). Как видно из рис. 1, показатель политропы ПВ во всех случаях, кроме гексогена, больше 3. Использование в составах пластификаторов приводит к возрастанию показателя политропы до 4 при содержании пластификатора 15—25%. При дальнейшем увеличении процентного содержания пластификатора (кривая 1) до 50% показатель политропы несколько падает, что связано, по-видимому, с уменьшением давления и показателя

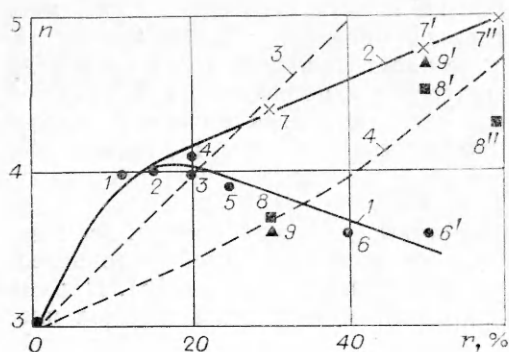


Рис. 1. Зависимость показателя политропы ПВ от процентного содержания инертной добавки (r) в составе ВВ.

0 — прессованный гексоген ($\rho_0 = 1,44$ г/см³); 1 — гексопласт-89; 2 — состав № 1; 3 — пластит-805; 4 — состав № 5; 5 — пластит Г-75; 6, 6' — Г-60, Г-50; 7, 7', 7'' — В-10, 30, 40; 8, 8', 8'' — Г+BaSO₄(10), Г+BaSO₄(30), Г+BaSO₄(40); 9, 9' — Г+Fe₂O₃(10), Г+Fe₂O₃(30).

политропы продуктов гексогена. Для индивидуального гексогена $n \approx 3$ при давлениях около 180 кбар и выше, при $p \approx 150$ кбар $n = 2,7$. Близко к кривой 1 лежат точки для систем с небольшим (10) процентным содержанием $BaSO_4$ и Fe_2O_3 . Резко увеличивают n добавки вольфрама. Точки для систем с содержанием $BaSO_4$ и Fe_2O_3 30—40% располагаются между кривыми 1 и 2, но ближе к кривой для систем с W.

Сделана попытка рассчитать показатель политропы ПВ двухкомпонентных составов типа гексоген — пластификатор (водная желатина) в аддитивном приближении [6, 9] по формулам

$$n = L_1 n_1 + (1 - L_1) n_2$$

(рис. 1, 3) и

$$1/n = L_1/n_1 + (1 - L_1)/n_2$$

(рис. 1, 4), где $n_1 = 3$ — показатель политропы ПВ гексогена; L_1 — процентное содержание гексогена; $n_2 = 8$ — показатель политропы пластификатора.

Из рис. 1 видно, что экспериментальные данные не согласуются даже качественно с расчетом (кривые 1, 3, 4). Сложная зависимость n от компонентного состава ВВ затрудняет предсказание показателя политропы ПВ смесевых составов с инертными наполнителями.

На рис. 2 представлена зависимость давления детонации от про-

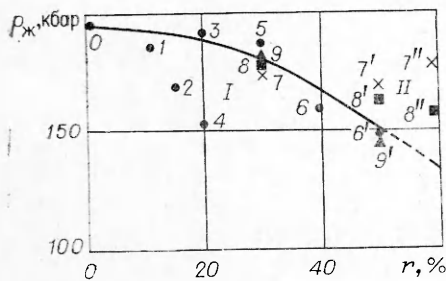


Рис. 2. Зависимость давления детонации от процентного содержания инертной добавки в составе ВВ (обозначения см. в подписи к рис. 1).

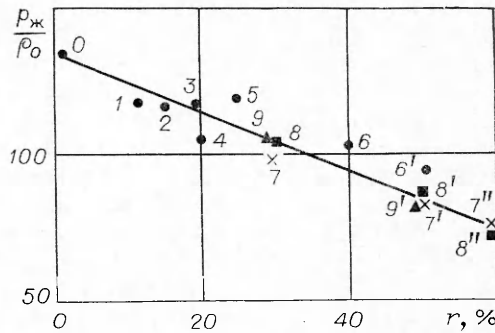


Рис. 3. Зависимость давления детонации, отнесенного к единице массы ВВ, от содержания инертной добавки (обозначения см. в подписи к рис. 1).

центного содержания инертных компонентов в составе ВВ. Как и следовало ожидать, давление детонации исследованных составов падает с увеличением содержания инертных компонентов. Однако на графике рис. 2 можно различить две области значений давлений. В область I попадают давления, развивающиеся при детонации составов типа гексоген — пластификатор, не содержащих утяжелителей, а также точки 7, 8, 9, соответствующие ВВ с небольшим содержанием (10%) тяжелых добавок. В области II находятся значения давлений детонации составов, плотность которых существенно увеличена за счет тяжелых добавок. Разброс значений p_j , наблюдающийся на рис. 2, очевидно, объясняется влиянием на давление детонации начальной плотности ВВ. Если же построить зависимость давления детонации, отнесенного к единице массы ВВ (p_j/ρ_0), от процентного содержания инертной добавки, то все точки хорошо ложатся на одну кривую (рис. 3). Эта зависимость позволяет в исследованных пределах при известном компонентном составе и плотности ВВ рассчитывать давление детонации смесевых ВВ по формуле

$$p_j/\rho_0 = 135 - 1,02r.$$

Для исследования зависимости механических свойств металлов от параметров детонации ВВ выбраны стали аустенитного класса 1X18H10T и Г13Л, так как эти материалы обладают способностью значительно упрочняться под действием УВ [4] и представляют интерес при практическом использовании метода взрывного упрочнения.

С целью ликвидации остаточной пластической деформации упрочнению подвергались образцы стали 1X18H10T (материал в состоянии поставки — листовая горячекатанная сталь) с большим отношением горизонтальных размеров (плоскость упрочнения) к вертикальным ($100 \times 200 \times 5$ мм), т. е. с высокой степенью запрещения остаточной пластической деформации. Для ликвидации отколов образцы устанавливались на стальное основание.

При упрочнении стали Г13Л применялись Т-образные литые, закаленные на аустенит образцы, имитирующие сечение сердечника железнодорожной крестовины. Для уменьшения величины остаточной пластической деформации и ликвидации отколов образцы заливались в свинцовую обойму и устанавливались на откольную плиту. Упрочнение сталей производилось накладными зарядами порошкообразных и пластичных ВВ в режиме скользящей детонационной волны, толщина зарядов ВВ составляла 5 мм.

Для оценки механических свойств упрочненных материалов (в каждом режиме упрочнялось 5—8 образцов) измерялась твердость образцов на поверхности упрочнения. В целях увеличения точности измерений в отличие от работы [5] поверхность образцов перед измерениями шлифовалась на глубину 0,2—0,4 мм. Ошибка экспериментов оценивалась по величине среднеквадратичного отклонения, которое нанесено на графиках. На рис. 4, 5 показаны зависимости твердости (НВ) сталей 1X18H10T и Г13Л от давления на границе раздела металл—ПВ при воздействии на образец скользящей детонационной волны. Из приведенных данных видно, что величина твердости исследованных сталей возрастает с ростом давления нагружения. При использовании однотипных ВВ без тяжелых добавок в исследованном интервале наблюдается линейная зависимость величины твердости от давления нагружения. Однако из этой зависимости выпадают точки, соответствующие действию на материалы ВВ, плотность которых существенно увеличена

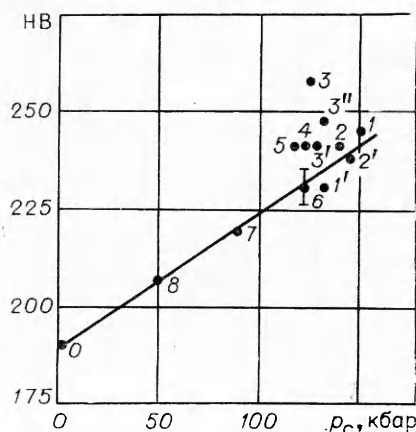


Рис. 4. Зависимость твердости стали 1X18H10T от давления нагружения. 0 — неупрочненный образец; 1 — пластит Г-75; 1' — Г-60; 2 — семтекс-1А; 2' — семтекс-1Н; 3, 3', 3'' — В-40; 10, 30; 4 — Г+BaSO₄ (30); 5 — Г+Fe₂O₃ (30); 6 — Г-50; 7 — порошкообразный гексоген; 9 — аммонит 6ЖВ.

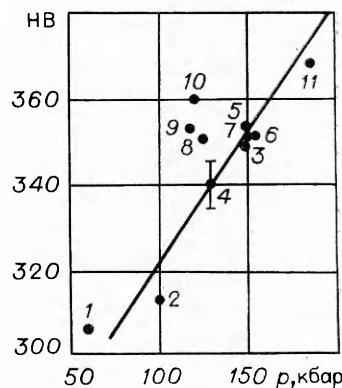


Рис. 5. Зависимость твердости стали Г13Л от давления нагружения.

1 — аммонит 6ЖВ; 2 — порошкообразный гексоген; 3 — гексопласт-89; 4 — состав № 5; 5 — пластит Г-75; 6 — эластит; 7 — пластит-805; 8 — В-10; 9 — В-30; 10 — В-40; 11 — пластит.

за счет тяжелых добавок, что подтверждает замеченное ранее в [5] повышенное упрочняющее действие ВВ, содержащих в составе порошок тяжелого металла. Несколько большее упрочнение по сравнению с ВВ без тяжелых добавок обеспечивают также составы, содержащие серно-кислый барий и окись железа (см. рис. 4, 4, 5).

В [5] высказано предположение, что повышенное упрочняющее действие металлизированных ВВ может быть связано с составом ПВ: наличие в ПВ твердых высокоплотных частиц приводит к своеобразной «бомбардировке» поверхности металла частицами и вызывает дополнительный прирост твердости материала.

Для проверки данного предположения в настоящей работе эксперимент проводился таким образом, чтобы максимально исключить при оценке твердости упрочненных материалов влияние непосредственного контакта образцов с ПВ. С этой целью перед определением твердости поверхность образцов шлифовалась, что позволило исключить влияние твердых частиц в составе ПВ, которые при взрывном воздействии напыляются на упрочняемый образец и могут влиять на величину твердости материала. Кроме того, проводился ряд экспериментов, в которых поверхность упрочняемых образцов защищалась от непосредственного действия ПВ тонкой металлической или полиэтиленовой прокладкой. Однако и в этих экспериментах высокоплотные ВВ обеспечивали большее упрочнение материалов по сравнению с мощными пластифицированными ВВ, не содержащими утяжелителей. Следовательно, эффект «бомбардировки» не оказывает существенного влияния на величину упрочнения материалов при взрывном нагружении.

Видимо, величина упрочнения не связана однозначно с давлением нагружения, а зависит также от других параметров детонации, например, от импульса взрыва. Так, в [7] сообщалось, что при воздействии на сталь Г13Л ударов пластин, существенно различающихся по величине и времени действия давления, может быть достигнута одинаковая степень упрочнения стали.

Ударный импульс, передаваемый материалу при взрыве на его поверхности заряда ВВ, можно оценить по величине импульсной силы $p_{имп} = p_{ж}(n+1)/n$ [8] или по формуле $I \sim \rho_0 D/n$ [9]. Однако расчет импульсов взрыва исследованных ВВ для упрочнения по приведенным формулам не выявляет преимуществ высокоплотных ВВ по сравнению с более мощными пластифицированными ВВ и не позволяет объяснить повышенное упрочняющее действие составов с утяжелителями.

В работе [5] обращалось внимание на то, что профиль разлета ПВ высокоплотных ВВ отличается от треугольного (выпуклая кривая), т. е. спад массовой скорости и, следовательно, давления, в таких ВВ затянут (рис. 6). Своеобразный разлет ПВ должен привести к увеличению импульса взрыва высокоплотных ВВ. Если полагать, что профиль спада давления в ПВ пропорционален профилю спада массовой скорости продуктов взрыва, то импульс взрыва можно оценить следующим выражением:

$$I = \int p(t) dt \sim \int \rho_0 D u(\tau) d\tau = \rho_0 D \int u(\tau) d\tau,$$

где τ — время спада от $u_{ж}$ до 0.

Зная параметры детонации в плоскости Чепмена—Жуге и профиль спада массовой скорости ПВ, можно определить относительный импульс исследуемых ВВ

$$I_{отн} = \frac{\rho_0 D \int u(\tau) d\tau}{\rho_0 D' \int u'(\tau') d\tau'}.$$

Оценка по приведенной формуле импульса металлизированного состава В-30 по отношению к пластику Г-75 и составу Г-60 дает соответственно следующие значения импульсов: 1,1 и 1,45.

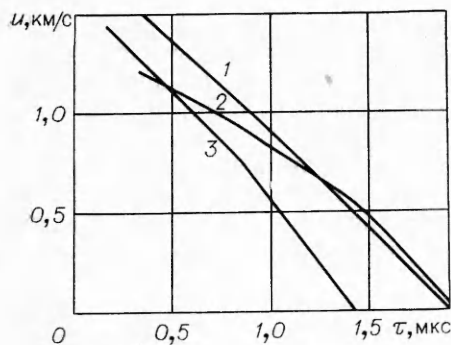


Рис. 6. Профиль массовой скорости ПВ.
1 — пластит Г-75; 2 — В-30; 3 — Г-60.

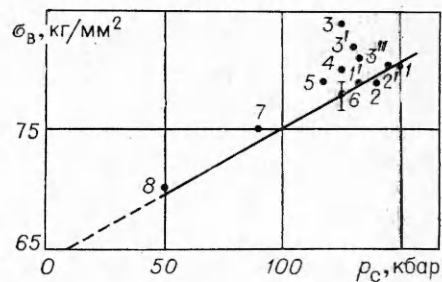


Рис. 7. Зависимость временного сопротивления на разрыв стали 1Х18Н10Т от давления нагружения (обозначения см. в подписи к рис. 4).

Таким образом, если при оценке импульсов исследованных ВВ учесть профиль разлета ПВ и полагать, что величина упрочнения исследованных материалов не связана однозначно с давлением детонации ВВ, а зависит также и от величины импульса, то с этих позиций удастся объяснить повышенное упрочняющее действие ВВ, содержащих в составе тяжелые добавки.

Поскольку характеристика поверхностной твердости материала не всегда является надежным критерием оценки механических свойств упрочненного материала, представляло интерес оценить прочностные и пластические характеристики упрочненных материалов в зависимости от режимов взрывного нагружения. Для этого проводились испытания на растяжение образцов стали 1Х18Н10Т: определялось временное сопротивление на разрыв σ_b , относительное удлинение образца δ , относительное сужение в шейке ψ (из упрочненных образцов вырезались плоские разрывные образцы — по 6—8 образцов для каждого режима упрочнения).

Зависимость временного сопротивления на разрыв от давления нагружения при взрывном упрочнении (рис. 7) имеет такой же вид, как и зависимость НВ (ρ_c).

Наибольшей прочностью при испытаниях на разрыв обладают образцы, упрочненные высокоплотными составами.

Таким образом, и в этих испытаниях проявляется повышенное упрочняющее действие ВВ с утяжелителями.

На рис. 8 показана зависимость относительного удлинения и относительного сужения образцов стали 1Х18Н10Т от временного сопротивления на разрыв. Из анализа рис. 8 видно, что при упрочнении стали 1Х18Н10Т составами с утяжелителями остаточная пластичность материала сохраняется в большей степени, чем при нагружении стали более мощными пластифицированными ВВ, не содержащими тяжелых добавок.

Таким образом, обнаружено, что применение различных режимов взрывного нагружения (использование ВВ с утяжелителями) позволяет получить при одной и той же прочности материала различные пластичности.

Причина такого поведения стали 1Х18Н10Т при взрывном нагружении не вполне ясна.

Возможно воздействие на упрочняемый материал высокоскоростных «резких» ВВ вызывает развитие в нем микротрещин, что приводит к снижению пластичности материала.

Полученный результат представляет, на наш взгляд, практический

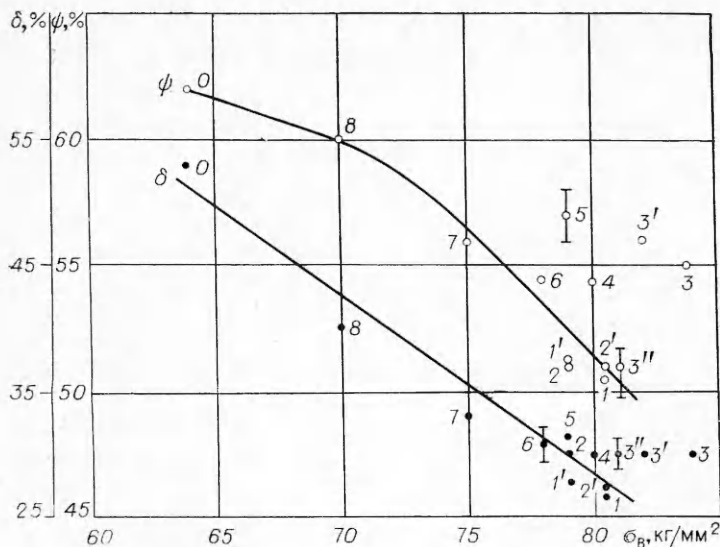


Рис. 8. Зависимость пластических характеристик стали 1X18N10T (δ , ψ) от временного сопротивления на разрыв (обозначения см. в подписи к рис. 4).

0 — неупрочненный образец; 1 — пластик Г-75, 1' — Г-60; 2 — семтекс-1А; 2' — семтекс-1Н; 3, 3', 3'' — В-40, 10, 30; 4 — Г+BaSO₄ (30); 5 — Г+Fe₂O₃ (30); 6 — Г-50; 7 — порошкообразный гексоген; 9 — аммонит 6ЖВ.

интерес, так как одной из причин, ограничивающей применение метода взрывного упрочнения на практике, является резкое снижение пластичности и опасность хрупкого разрушения материала.

Применение пластифицированных ВВ, содержащих в составе тяжелые добавки, расширяет возможности взрывного упрочнения, поскольку такие ВВ позволяют в большей степени, чем мощные ПВВ, сохранить остаточную пластичность материала при упрочнении с одновременным значительным увеличением его прочностных свойств.

Поступила в редакцию 29/V 1978,
после доработки — 15/XI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. Дж. С. Райнхарт, Дж. Пирсон. Взрывная обработка металлов. М., «Мир», 1966.
3. П. О. Пашков, З. М. Гелунова. Действие ударных волн на закаленные стали. Волгоград, Нижне-Волжское кн. изд-во, 1969.
4. И. Н. Богачев, М. А. Филиппов.— В сб.: Высокоскоростная деформация. М., «Наука», 1971, с. 60.
5. Е. И. Богдановская, Л. В. Дубнов и др. ФГВ, 1975, 11, 5, 781.
6. Л. В. Алтшуллер, В. Т. Рязанов, М. П. Сперанская. ПМТФ, 1972, 1, 122.
7. A. R. Champion, R. W. Rohde. J. Appl. Phys., 1970, 41, 5, 2213.
8. Л. В. Дубнов, Н. С. Бахаревич, А. И. Романов. Промышленные взрывчатые вещества. М., «Наука», 1973.
9. А. Я. Апин, Е. П. Бардин, Н. Ф. Велина.— В сб.: Взрывное дело, № 52/9. М., Гостехиздат, 1969.