



РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ У10А**

Карнаухов Е.И., Павленко А.В., Малюгина С.Н., Казаков Д.Н., Майорова А.С., Мокрушин С.С.

## Механические свойства стали У10А

Материал	Твердость	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0.2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\sigma_{ск}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Примечание
Сталь У10А	197НВ	55-65	22-35	55	440-480	
Закаленная сталь У10А	65HRC	172	-	-	530-540	нагрев 770-780°C отпуск 140-160 °C

Цель данной работы:

- Исследование влияния скорости деформирования на прочностные свойства стали У10А в состоянии поставки и после закалки для использования в дальнейшем при подборе параметров модели Джонсона-Кука с УРС Ми-Грюнайзена.

$$Y = (A + B\varepsilon_p^n) \cdot \left( 1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \cdot \left( 1 - \left[ \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right]^m \right)$$

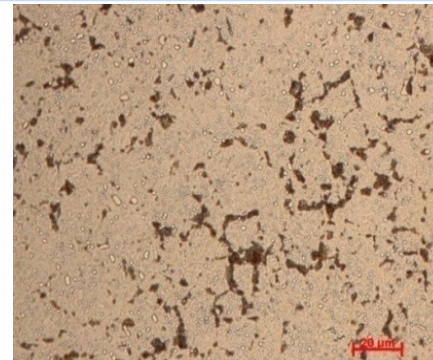
$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) E$$

Johnson, G.R. and W.H. Cook, .A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures. Presented at the Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, April 1983.

## Химический состав сталей У10А (ГОСТ 1435-99)

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	Углерода	Кремния	Марганца	Серы	Фосфора	Хрома	Никеля	Меди
				не более				
У8А	0,75-0,85	0,17-0,33	0,17-0,28	0,018	0,025	0,12	0,12	0,2
<b>У10А</b>	<b>0,95-1,09</b>	<b>0,17-0,33</b>	<b>0,17-0,28</b>	<b>0,018</b>	<b>0,025</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,2</b>
У12А	1,16-1,23	0,17-0,33	0,17-0,28	0,018	0,025	0,12	0,12	0,2

# Исследуемые образцы стали У10А



Микроструктура поперечного (слева) и продольного (справа) сечений образца в исходном состоянии (группа И).

Снято при увеличении  $\times 500$

**Пластинчатый перлит**

Микроструктура поперечного (слева) и продольного (справа) сечений образца стали У10А после закалки (группа З)

Снято при увеличении  $\times 500$

**Зернистый перлит**

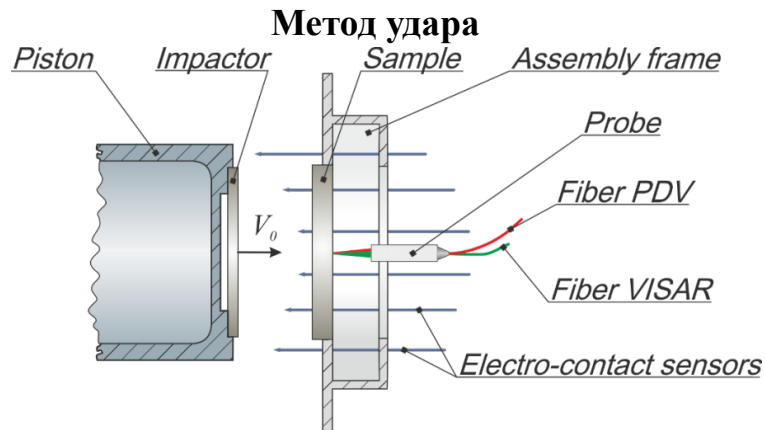
## Свойства исследуемых образцов стали У10А

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	HV <sub>0,1</sub> гс/мм <sup>2</sup>	$C_p$ м/с	$C_s$ м/с	$C_{0p}$ м/с	$E$ , МПа	$G$ , МПа	$K$ , МПа
Сталь У10А в исходном состоянии (группа И)	7,77	429-775	5977	3229	4671	209,6	81	169,6
Закаленная сталь У10А (группа З)	7,77	856-916	6654	3590	5205	259,3	100,1	201,5

В результате закалки изменилась структура стали У10А с пластинчатого перлита на зернистый перлит,

модуль сдвига  $G$  стали У10А увеличился на 19%, модули Юнга  $E$  и сжатия  $K$  – на 22..23%.

## Экспериментальная аппаратура



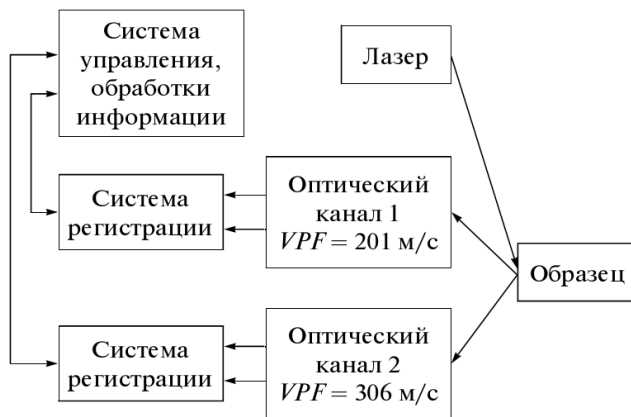
### Измерение скорости $W(t)$ :

- VISAR
- PDV

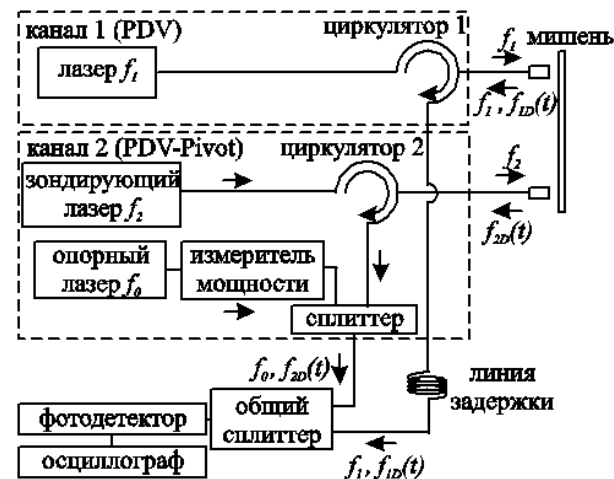
### Скорость соударения $V_0$ :

- метод ЭКД

### Комплекс VISAR



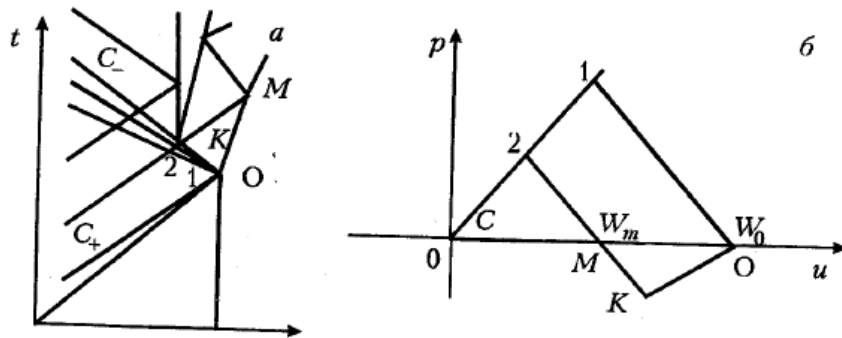
### Комплекс PDV



Павленко А.В., Балабин С.И., Козелков О.Е., Казаков Д.Н.. Одноступенчатая газовая пушка для изучения динамических свойств конструкционных материалов в диапазоне до 40 ГПа // ПТЭ, 2013, №4, С.122-124.

Павленко А.В., Малюгина С.Н., Перешитов В.В., Лисицына И.Н. Двухканальный интерферометрический комплекс VISAR для исследования свойств материалов при ударно-волновом нагружении // ПТЭ, 2013, №2, С.127-129.

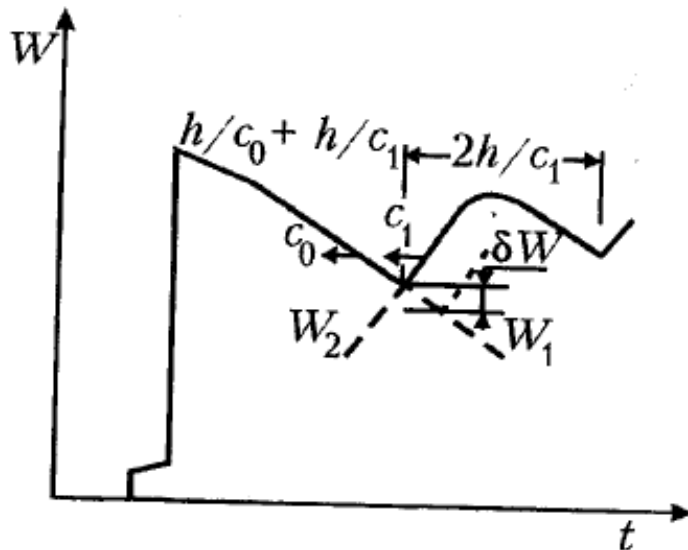
Мокрушин С.С., Аникин Н.Б., Малюгина С.Н., Павленко А.В., Тягтев А.А. Интерферометр с частотно-временным уплотнением сигналов для исследования свойств материалов в ударно-волновых экспериментах // ПТЭ, 2013, №4, с.107-109.



$$\sigma_{sp} = 0,5 \cdot \rho_0 \cdot C_0 \cdot (W_0 - W_m + \delta W)$$

$$\delta W = \left( h/c_0 - h/c_l \right) \cdot \frac{|\dot{W}_1 \cdot \dot{W}_2|}{|\dot{W}_1| + \dot{W}_2}$$

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = \frac{\dot{W}}{2C_0}$$



$$\sigma_{hel} = 0.5 \cdot \rho_0 \cdot c_l \cdot W_{hel}$$

$$\sigma_{\tau} = 1.5 \cdot \sigma_{hel} \cdot \left( 1 - c_0^2/c_l^2 \right)$$

$$\tau_T = 0.75 \sigma_{hel} \left( 1 - c_0^2/c_l^2 \right)$$

## Данные о постановке экспериментов



Данные о постановке экспериментов с образцами стали У10А в исходном состоянии (группа И)

№ Дата эксперимента	Толщи на ударника $h_y$ , мм	Скорость $V_0$ , м/с	Переко с, мрад	Толщина образца $h_0$ , мм
№106 от 23.10.15	1,986	809,2±2,4	1,9	4,001
№107 от 26.10.15	1,989	626,9±1,9	0,37	3,998
№108 от 27.10.15	1,983	397,2±2,0	0,78	3,998
№109 от 28.10.15	1,984	197,1±0,6	0,65	3,998
№113 от 05.11.15	1,991	171±2	-	4,003
№114 от 06.11.15	1,984	751,8±2,3	2,3	3,994
№115 от 10.11.15	1,991	1027,9±3,1	0,47	4,005
№116 от 12.11.15	1,004	651,7±2	0,91	1,983
№117 от 13.11.15	0,464	667,7±2,0	1,16	1,024
№118 от 16.11.15	1,983	639,7±1,9	2,45	7,981
№119* от 18.11.15	0,091	629,0±4,4	0,51	0,577
№120 от 20.11.15	0,472	416,5±0,8	0,90	1,007
№126 от 30.11.15	2,015	342,3±0,7	0,46	3,989

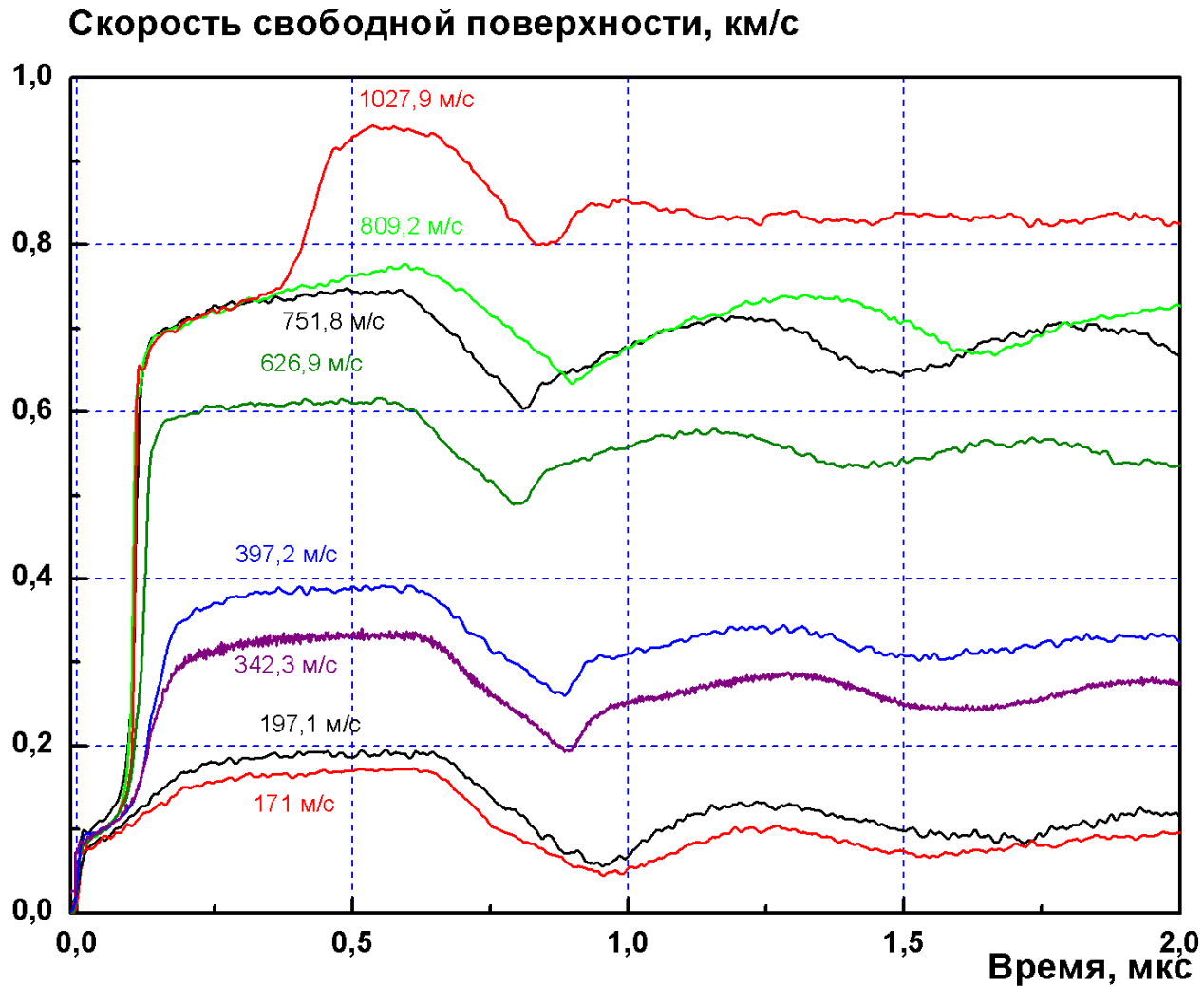
во всех экспериментах использовали в качестве ударников и образцов сталь У10А в исходном состоянии  
\* в качестве ударника использовалась фольга из стали 12Х18Н10Т

Данные о постановке экспериментов с образцами из закаленной стали У10А (группа З)

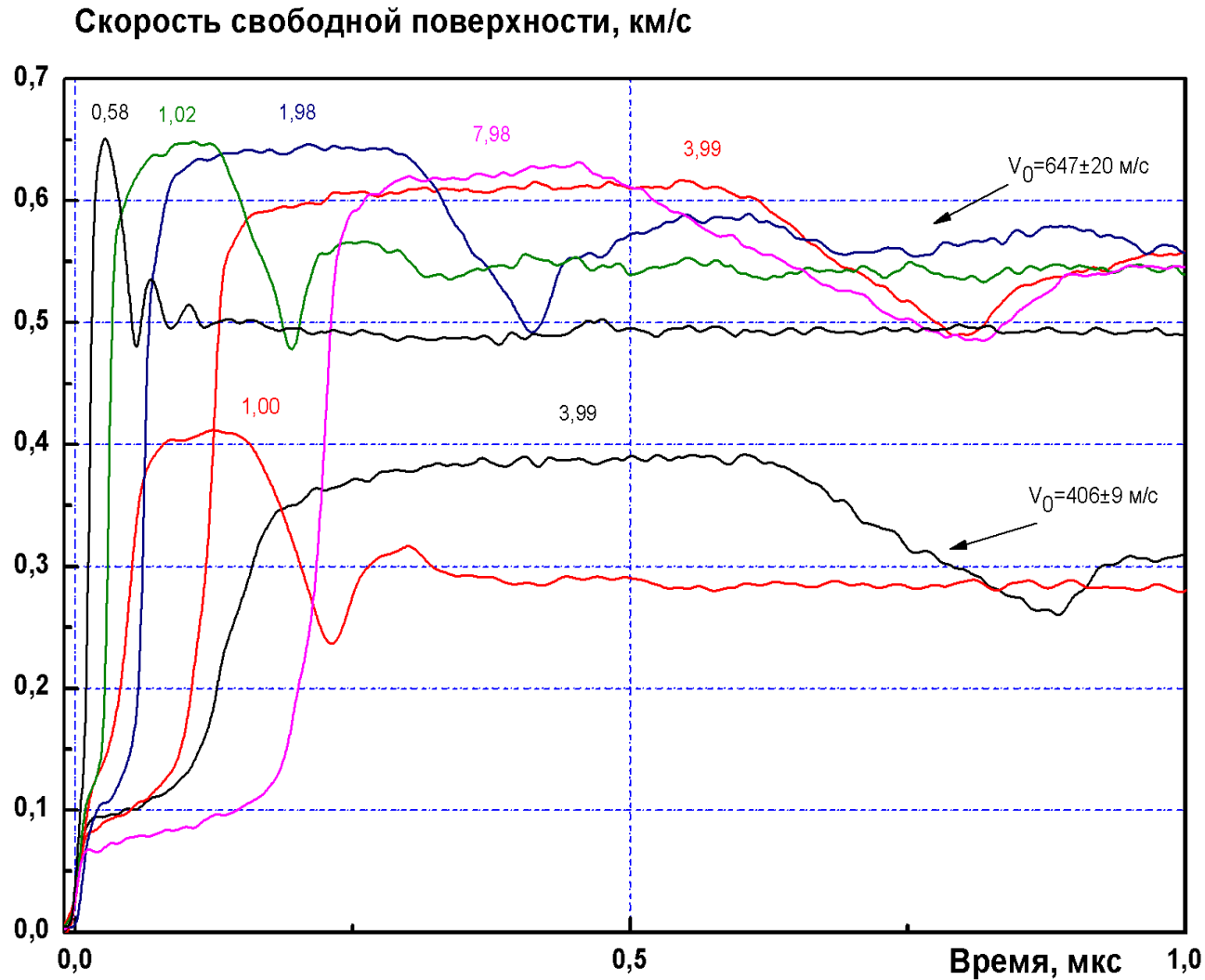
Дата № эксперимента	Толщина ударника $h_y$ , мм	Скорость $V_0$ , м/с	Переко с, мрад	Толщина образца $h_0$ , мм
№133 от 10.12.15	1,912	393,4±1,2	0,85	3,941
№135 от 14.12.15	1,908	987,5±2,9	0,98	3,949
№137* от 18.12.15	0,51	409,6±0,8	0,28	0,868

во всех экспериментах использовали в качестве ударников и образцов сталь У10А в закаленном состоянии  
\* ударник – сталь 30ХГСА

# Экспериментальные профили скорости свободной поверхности стали У10А в исходном состоянии (группа II). $V_0=171-1027,9$ м/с.

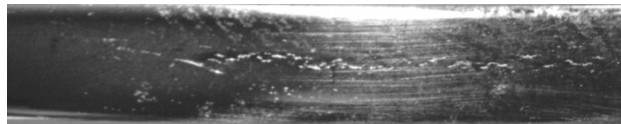


# Экспериментальные профили скорости свободной Поверхности образцов стали У10А в исходном состоянии (группа II). $V_0=647\pm 20$ м/с и $V_0=406\pm 9$ м/с.



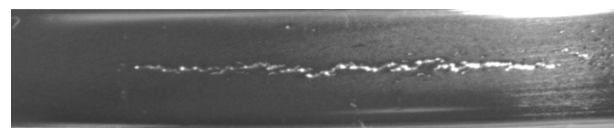


# Эксперименты с образцами стали У10А в исходном состоянии (группа II)



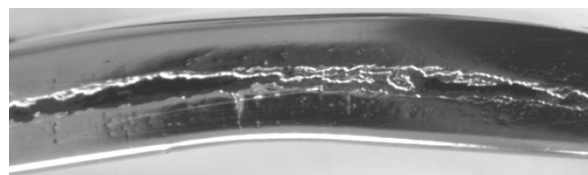
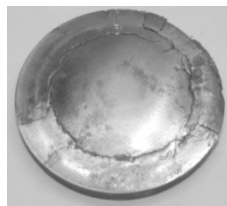
Интенсивное микроразрушение  
в виде отдельных трещин

Эксперимент №113 ( $\tau=0,85$  мкс;  $V_0=171\pm 2,0$  м/с)



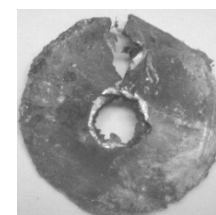
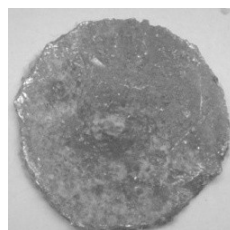
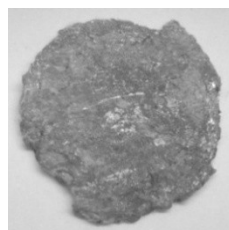
Слабое макроразрушение,  
«формирующее» область  
откольного разрушения

Эксперимент №109 ( $\tau=0,82$  мкс;  $V_0=197,1\pm 0,6$  м/с)



Частичное откольное  
разрушение в виде  
магистральной трещины

Эксперимент №108 ( $\tau=0,75$  мкс;  $V_0=397,2\pm 2,0$  м/с)



Полное откольное  
разрушение,  
толщина  
откольных слоев  
1,8..2,2 мм

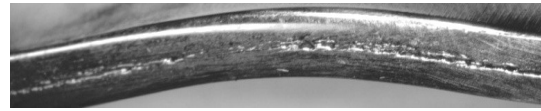
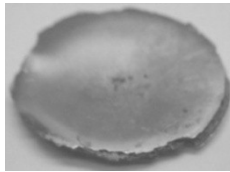
Эксперимент №107  
 $\tau=0,68$  мкс,  
 $V_0=626,9\pm 1,9$  м/с

Эксперимент №114  
 $\tau=0,71$  мкс,  
 $V_0=751,8\pm 2,3$  м/с

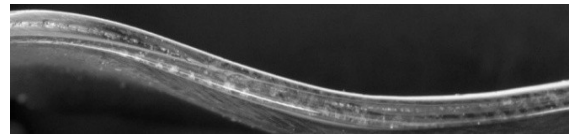
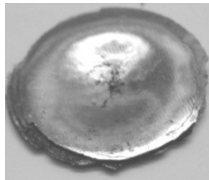
Эксперимент №106  
 $\tau=0,8$  мкс,  
 $V_0=809,2\pm 2,4$  м/с

Эксперимент №115  
 $\tau=0,75$  мкс,  
 $V_0=1027,9\pm 3,1$  м/с

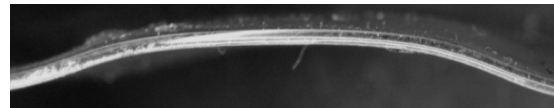
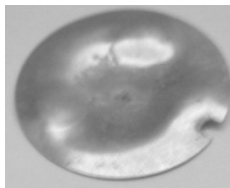
# Эксперименты с образцами стали У10А в исходном состоянии (группа II) при разной длительности нагружения



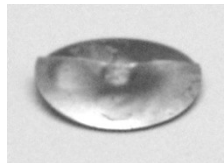
Эксперимент №116 ( $\tau=0,35$  мкс,  $V_0=651,7\pm 2$  м/с)



Эксперимент №117 ( $\tau=0,15$  мкс,  $V_0=667,7\pm 2,0$  м/с)

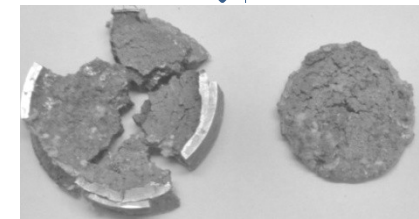


Эксперимент №119 ( $\tau=0,04$  мкс,  $V_0=629,0\pm 4,4$ )



Эксперимент №120 ( $\tau=0,18$  мкс,  $V_0=416,5\pm 0,8$ )

Полное откольное разрушение, как в эксперименте 107 при  $V_0=626,9\pm 1,9$  м/с



Эксперимент №118  
( $\tau=0,59$  мкс,  $V_0=639,7\pm 1,9$ )

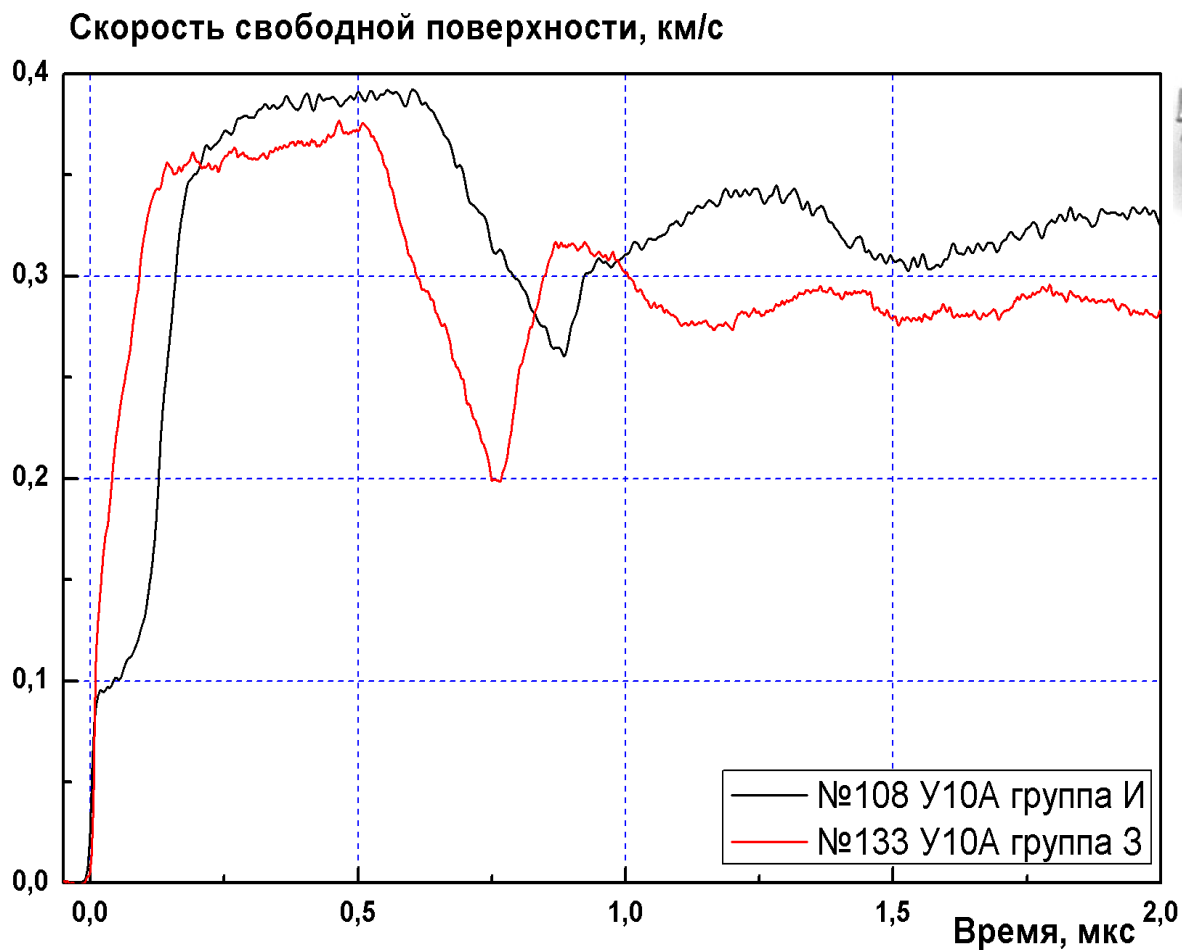
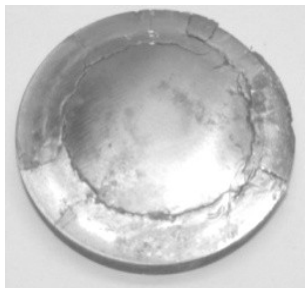


Эксперимент №107  
 $\tau=0,68$  мкс,  
 $V_0=626,9\pm 1,9$  м/с

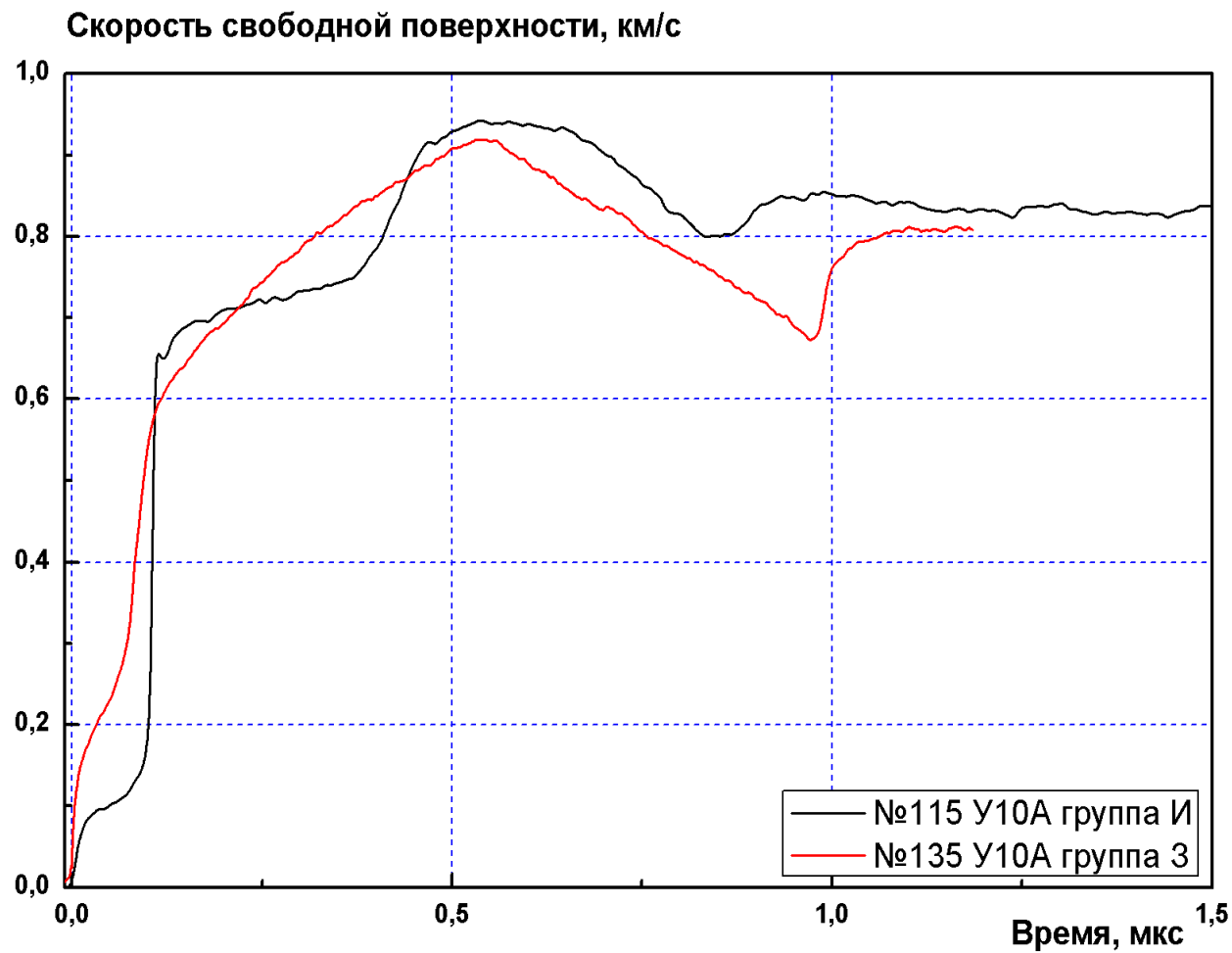
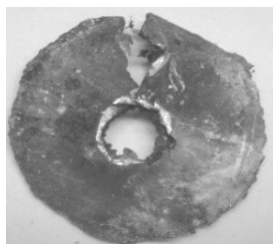
Видно, что при снижении длительности ударно-волнового нагружения характер разрушения меняется, образцы разрушаются частично. Для более детальной информации требуется проведение металлографического анализа

# Эксперименты с образцами из закаленной стали У10А

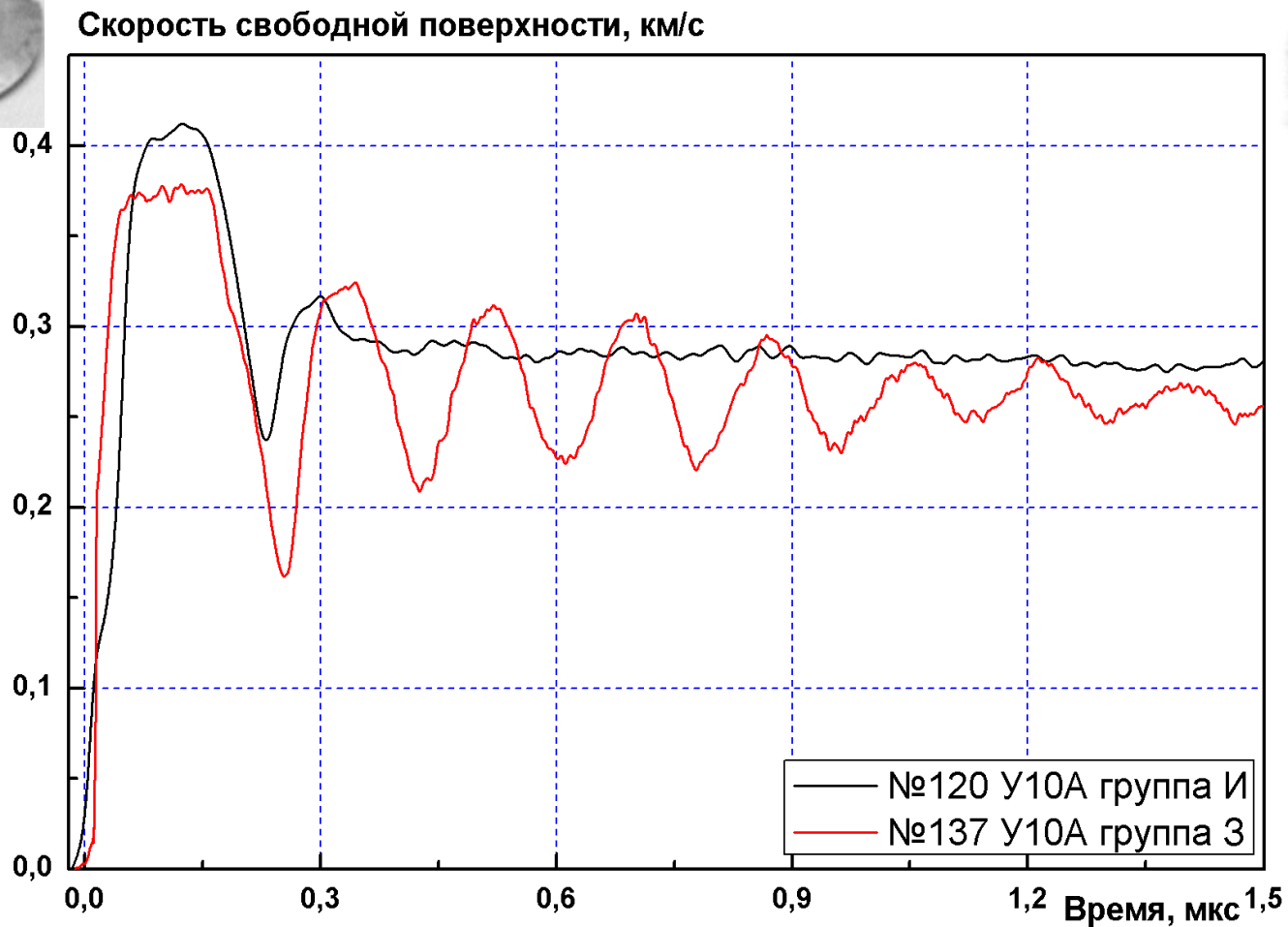
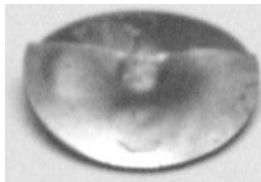
Сопоставленные профили скорости  $W(t)$  для обеих групп образцов стали У10А.  
Эксперименты №108 и №133



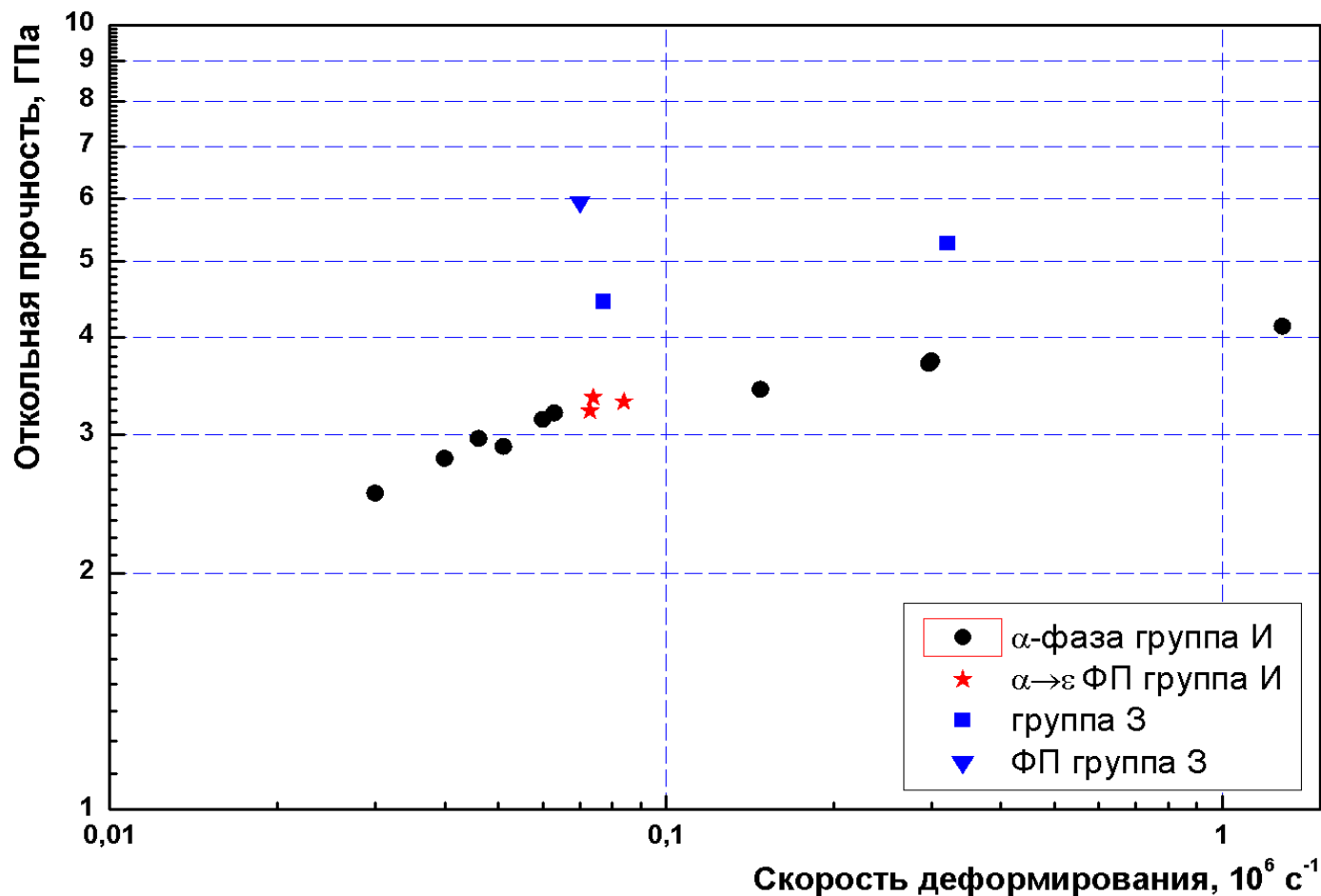
# Сопоставленные профили скорости $W(t)$ для обеих групп образцов стали У10А. Эксперименты №115 и №135



# Сопоставленные профили скорости $W(t)$ для обеих групп образцов стали У10А. Эксперименты №120 и 137

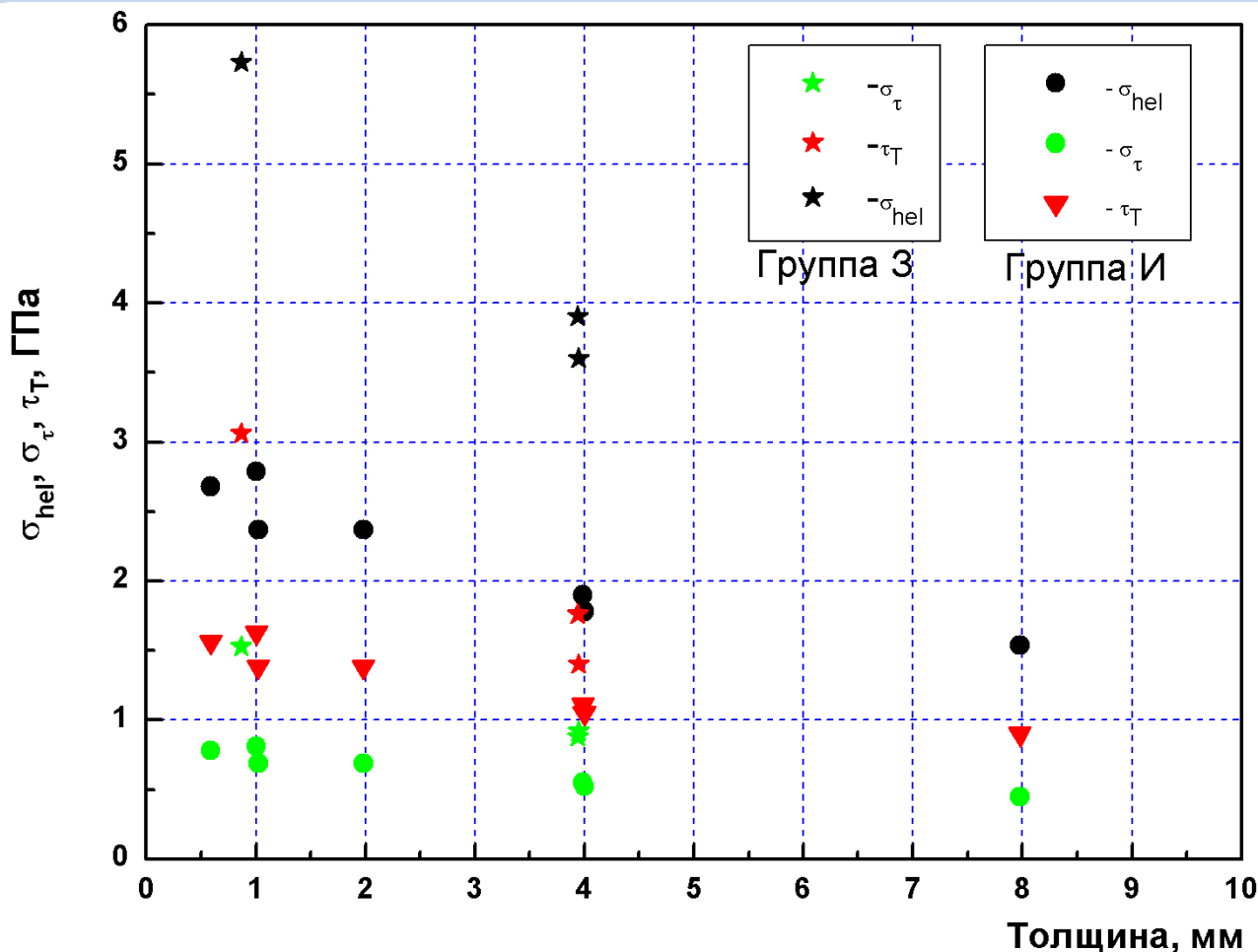


# Зависимости откольной прочности от скорости деформирования для обеих групп стали У10А



Значение  $\sigma_{sp}$  для образцов стали У10А (группа I), претерпевших фазовое превращение находится в диапазоне 3,2..3,4 ГПа, в то время как значение для образца из закаленной стали У10А, претерпевшего фазовое превращение, составило  $\sigma_{sp}=5,95$  ГПа. В экспериментах №133 и №137  $\sigma_{sp}=4,45$  ГПа и  $\sigma_{sp}=5,28$  ГПа

# Зависимости $\sigma_{hel}$ , $\sigma_{\tau}$ и $\tau_{\tau}$ от толщины для обеих групп образцов стали У10А



В экспериментах с образцами толщиной 4 мм значения  $\sigma_{hel}$  возросли с 1,7... 1,9 ГПа до 3,6... 3,9 ГПа, а с образцами толщиной 1 мм – с 2,7...2,8 до 5,7 ГПа. Значения динамического предела текучести  $\sigma_{\tau}$  и сдвигового напряжения  $\tau_{\tau}$  также увеличились. С образцами толщиной 1 мм значения  $\sigma_{\tau}$  увеличились с 1,4...1,6 до 3,1 ГПа и  $\tau_{\tau}$  – с 0,8 до 1,6 ГПа, а с образцами толщиной 4 мм –  $\sigma_{\tau}$  с 1,1 до 1,8 ГПа и  $\tau_{\tau}$  с 0,5 до 0,9 ГПа

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ



В НИО-5 на одноступенчатой легкогазовой пушке ЛГП-1200 проведены ударно-волновые эксперименты по исследованию динамических свойств образцов стали У10А в исходном состоянии и после закалки.

Исследования проводили с целью определения неизвестных динамических свойств углеродистой стали У10А и для использования экспериментальных профилей скорости свободной поверхности образцов для подбора параметров модели Джонсона-Кука с УРС Ми-Грюнайзена.

По результатам исследований динамических свойств образцов стали У10А в исходном состоянии (группа И) можно сделать следующие выводы:

- в исходном состоянии материал имеет тенденцию к упрочнению в диапазоне скорости деформирования от  $0,03 \cdot 10^6$  до  $1,3 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>;
- в процессе распространения ударной волны в образцах динамический предел упругости  $\sigma_{hel}$  монотонно снижается с 2,8 ГПа на расстоянии 0,5 мм до 1,6 ГПа на расстоянии 8 мм;
- динамический предел текучести  $\sigma_t$  – с 1,63 ГПа до 0,9 ГПа;
- сдвиговое напряжение  $\tau_t$  – с 0,9 ГПа до 0,47 ГПа.

Сравнение результатов измерения динамических свойств образцов из закаленной стали У10А и в исходном состоянии показывает, что:

- закаленная сталь У10А имеет 1,35..1,4 раза более высокие значения откольной прочности;
- динамические пределы упругости  $\sigma_{hel}$ , предела текучести  $\sigma_t$  и сдвигового напряжения  $\tau_t$  также увеличились в закаленной стали У10А, а именно: в экспериментах с образцами толщиной 4 мм значения  $\sigma_{hel}$  возросли с 1,7... 1,9 ГПа до 3,6... 3,9 ГПа, а с образцами толщиной 1 мм – с 2,7...2,8 до 5,7 ГПа. С образцами толщиной 1 мм значения  $\sigma_t$  увеличились с 1,4...1,6 до 3,1 ГПа и  $\tau_t$  – с 0,8 до 1,6 ГПа, а с образцами толщиной 4 мм –  $\sigma_t$  с 1,1 до 1,8 ГПа и  $\tau_t$  с 0,5 до 0,9 ГПа соответственно.
- динамические пределы упругости  $\sigma_{hel}$ , предела текучести  $\sigma_t$  и сдвигового напряжения  $\tau_t$  также монотонно снижаются по мере увеличения толщины образцов.

Авторы искренне благодарят Б.И. Израилева и А.Ю. Ерьско за постановку задачи, Р.Р. Исхужина и К.К. Хафизову за измерения скоростей звука в образцах стали У10А, Е.А. Мусаеву и Л.В. Свинцову за помощь в определении микроструктуры и микротвердости образцов, М.Ф. Герашенко и М.И. Деньгина за помощь при подготовке и проведении экспериментов.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**

