

05 Субмикросекундная прочность ($\alpha + \beta$) титанового сплава BT22 в условиях плоского ударно-волнового нагружения

© Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных, И.А. Черепанов, В.Е. Брейкина, С.В. Разоренов

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

E-mail: garkushin@fcp.ac.ru

Поступило в Редакцию 17 июля 2025 г.

В окончательной редакции 13 августа 2025 г.

Принято к публикации 29 августа 2025 г.

Представлены результаты измерений динамического предела упругости и откольной прочности образцов высокопрочного ($\alpha + \beta$) титанового сплава BT22 при ударно-волновом нагружении со скоростью ударника 850 ± 30 м/с. Экспериментальные результаты по затуханию упругого предвестника в зависимости от пройденного волной расстояния описаны степенной зависимостью. Получены новые данные о динамической прочности сплава BT22 в диапазоне скоростей деформирования $10^4 - 10^6$ с⁻¹ в волне разрежения перед откольным разрушением.

Ключевые слова: титановый сплав, ударные волны, прочность, интерферометр.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.01.61914.20446

Высокопрочные титановые сплавы широко используются в качестве крупноузловых деталей или брони в авиакосмической и оборонной промышленности благодаря своим уникальным свойствам: малому весу и высокой прочности [1]. Поскольку механические свойства сплавов сильно зависят от введенных легирующих элементов (Al, V, Mn, Mo, Cr, Fe и др.), в расчетах при проектировании и моделировании изделий и конструкций, которые могут подвергаться сильным импульсным воздействиям в процессе эксплуатации, необходимо знать механические свойства конкретного сплава при ударных нагрузках, а именно динамический предел упругости и откольную прочность в диапазоне скоростей деформирования $10^4 - 10^7$ с⁻¹. Данные в виде температурно-скоростных зависимостей напряжения течения в условиях высокоскоростного разрушения опубликованы для титана малой (BT1-0) и средней (BT6) прочности в работах [2–4]. Для конструкционного титанового сплава BT22 исследования в подобных условиях ранее не проводились.

Целью проведенных экспериментов было получение новых экспериментальных данных, необходимых для определения зависимостей динамического предела упругости и откольной прочности, и сопоставление их с имеющимися литературными данными по прочности титановых сплавов средней прочности. Измерения основываются на том факте, что структура волн и динамика волновых взаимодействий определяются процессами упругопластического деформирования и разрушения в материале. Прочность при малых длительностях нагрузки определяется путем анализа откольных явлений, возникающих при отражении импульса сжатия от поверхности тела [5].

В настоящей работе проведены ударно-волновые испытания горячекатаного титанового сплава BT22 производства ВСМПО-АВИСМА. Химический состав исследуемого сплава согласно сертификату поставки представлен в табл. 1.

Методом гидростатического взвешивания на аналитических весах ME204T измерена плотность ρ сплава. Измерения продольной c_l и сдвиговой c_s скоростей звука проводили на аппарате МГНИВП „Акустика“ с частотой преобразователя 2.5 МГц методом сквозного прозвучивания. Объемная скорость звука рассчитывалась с помощью соотношения $c_b = \sqrt{c_l^2 - 4c_s^2/3}$. Фазовый анализ, проведенный на дифрактометре ДРОН-4 в геометрии Брэгга–Брентано, позволил определить общую объемную долю (%) α - и β -фаз. Также для этого сплава было измерено значение твердости HRB на автоматизированном стационарном твердомере ТН-300. В табл. 2 представлены измеренные характеристики для титанового сплава BT22.

Для ударно-волновых экспериментов с помощью электроэрозионного станка АРТА из прутка диаметром 28 мм вырезались плоскопараллельные образцы толщиной h от 0.2 до 10 мм так, что их плоскость была перпендикулярна направлению прокатки. Для обеспечения отражательной способности поверхности образцов шлифовались и полировались с двух сторон. Плоские ударные волны в направлении, параллельном направлению прокатки, генерировались алюминиевыми пластинами-ударниками толщиной H_{imp} . Метание ударников осуществлялось с применением специальных взрывных устройств во взрывной камере. Испытания проведены на воздухе при нормальной температуре. Скорость ударников составляла 850 ± 30 м/с. Непрерывная регистрация профилей скорости свободной поверхности $u_{fs}(t)$ осу-

Таблица 1. Химический состав (wt.%) титанового сплава BT22 (Ti — основа)

Al	Mo	V	Zr	Cr	Si	Fe	C	O ₂	N ₂	H ₂
5.3	4.5	4.75	4.62	1.04	0.034	0.67	0.009	0.074	0.015	0.004

Таблица 2. Измеренные параметры титанового сплава BT22

Фазовый состав	Объемная доля фазы, %	σ_B , МПа	HRB	c_l , м/с	c_s , м/с	c_b , м/с	ρ_0 , г/см ³
α (ГПУ)	52.3	1170	113	5962	3095	4772	4.608
β (ОЦК)	47.7						

ществлялась с применением лазерного доплеровского интерферометра VISAR с разрешением 1 ns по времени и ± 3 м/с по измеряемой скорости [6].

На рис. 1 представлены увеличенные фронтальные части, а также полные профили скорости свободной поверхности образцов титанового сплава BT22 различной толщины. На представленных волновых профилях фиксируется последовательно выход на поверхность упругого предвестника, пластической ударной волны, следующей за ней области постоянства параметров *Plato* и затем части волны разрежения. Длительность *Plato* определяется соотношением толщин ударников и образцов. Во избежание выхода на свободную поверхность слабой волны сжатия (воздушной волны) перед фронтом упругого предвестника образцы размещались на алюминиевой пластине (экране) толщиной H_{bp} . Воздушная ударная волна, как правило, движется впереди летящего ударника и может вносить погрешность в измерение времени нарастания скачка во фронте упругого предвест-

ника. Амплитуда упругого предвестника соответствует динамическому пределу упругости σ_{HEL} , рассчитывается по измеренной скорости свободной поверхности u_{HEL} как $\sigma_{HEL} = \rho c_l u_{HEL} / 2$ [5]. Упругий предвестник сплава BT22 содержит пик (*peak*) на фронте волны и, следовательно, должен характеризоваться двумя значениями динамического предела упругости: $\sigma_{HEL(peak)}$ и $\sigma_{HEL(min)}$ (рис. 1). Пик на фронте обычно формируется в тех случаях, когда процесс пластической деформации и вызванная ею релаксация напряжений происходит с достаточно большим ускорением. При дислокационном механизме пластической деформации ускорение вызывается размножением дислокаций по мере их движения. Время нарастания параметров в пластической волне определяется вязкостью материала.

Результаты измерений четко демонстрируют затухание упругого предвестника при его распространении по образцу (рис. 1). Рассчитанные значения динамического предела упругости сплава BT22 в сопоставлении с

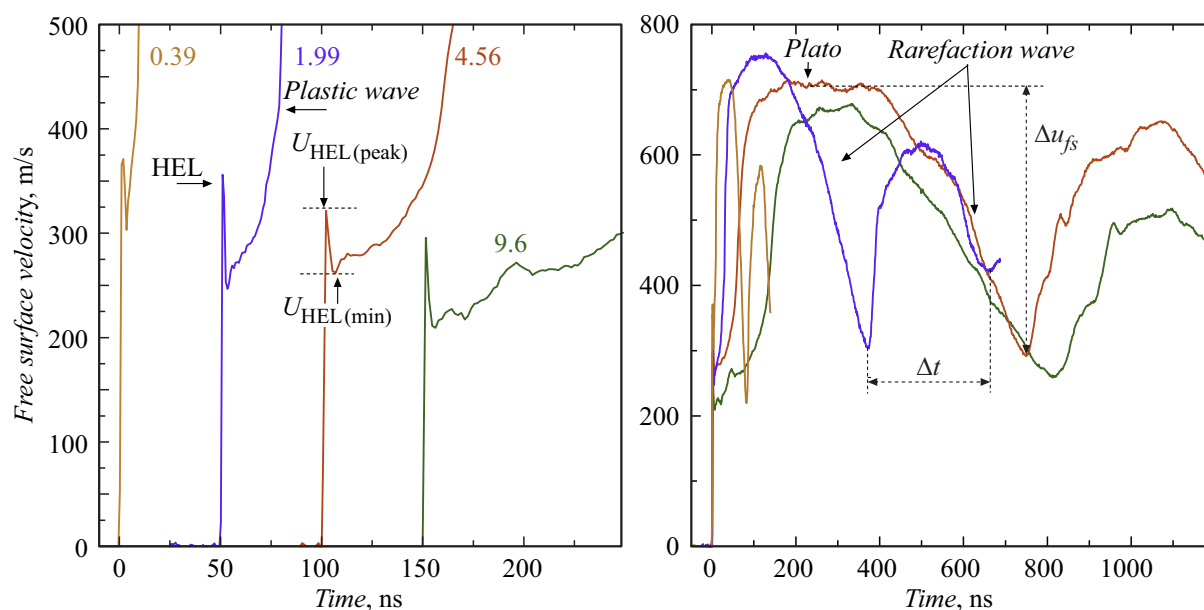


Рис. 1. Профили скорости свободной поверхности образцов горячекатаного высокопрочного ($\alpha + \beta$) титанового сплава BT22. Слева приведены фронтальные части волновых профилей. Цифрами указана толщина образца в мм.

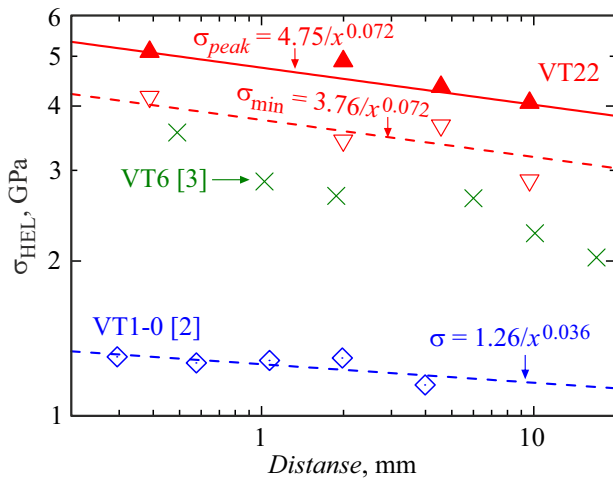


Рис. 2. Затухание упругого предвестника в зависимости от толщины образцов горячекатаного титанового сплава VT22 в сопоставлении с данными для технического титана VT1-0 [2] и сплава VT6 [3]. Для сплава VT22 показаны напряжения в точках максимума (вершина фронтального пика „peak“) и минимума „min“.

данными для сплава VT1-0 [2] и VT6 [3] представлены на рис. 2. Затухание предвестника может быть описано степенным соотношением эмпирической зависимостью $\sigma_{HEL} = \sigma_0(h/h_0)^{-\alpha}$ [5], где σ_0 — величина динамического предела упругости для образцов толщиной $h_0 = 1$ mm. Величины $\sigma_{0(peak)} = 4.75$ GPa и $\sigma_{0(min)} = 3.76$ GPa, а также степенной показатель $\alpha = 0.072$ являются подгоночными параметрами и определяются верификацией нашими экспериментальными данными. Необходимо отметить, что затухание упругого предвестника в технически чистом титане VT1-0 происходит медленнее в 2 раза ($\alpha = 0.036$), в сплаве VT6 затухание описывается соотношением $\sigma_{HEL} = 3.05(h)^{-0.135}$.

На рис. 3 суммированы результаты измерений динамической (откольной) прочности на разрыв для титанового сплава VT22 в сопоставлении с подобными данными для технически чистого титанового сплава VT1-0 [2], VT6 [3] и VT20 [7]. Величина разрушающего напряжения при отколе в линейном приближении определяется как $\sigma_{sp} = 0.5\rho c_b(\Delta u_{fs} + \delta u)$ [5]. Значения откольной прочности получены из обработки измеренных волновых профилей (рис. 1). Результаты представлены в виде зависимостей откольной прочности титановых сплавов от скорости расширения вещества \dot{V}/V_0 в волне разрежения перед откольным импульсом [5], которая определяется как $\dot{V}/V_0 = -\dot{u}_{fsr}/2c_b$, где \dot{u}_{fsr} — измеренная скорость спада волнового профиля в разгрузочной части импульса ударного сжатия. Данные измерений откольной прочности в широком диапазоне скоростей деформирования для титанового высокопрочного сплава VT22 были описаны степенной зависимостью $\sigma_{sp} = 1.86(\dot{V}/V_0)^{0.089}$. Необходимо отметить, что откольная прочность сплава VT22 существенно выше прочности технического титана

VT1-0 и превосходит прочность сплавов VT6 и VT20 в диапазоне скоростей деформирования 10^4 – 10^6 s $^{-1}$. Высокая прочность сплава VT22 может объясняться сильной гетерогенностью структуры с большим количеством дислокаций и наличием упрочняющих фаз, присутствующих за счет его легирования.

В табл. 3 приведены параметры условий экспериментов и результаты обработки и анализа профилей скорости свободной поверхности,

$$U_S = c_l(2h - c_l\Delta T)/(2h + c_l\Delta T)$$

— скорость пластической волны, где ΔT — разница во времени выхода на свободную поверхность средней части упругой и пластической волны. Максимальное напряжение сжатия определяли как

$$\sigma_{max} = \sigma_{HEL} + \rho_{el}U_S(u_{max} - u_{HEL})/2,$$

где $\rho_{el} = \rho c_l/(c_l - u_{HEL}/2)$ — плотность после упругого сжатия, $\Delta u_{fs} = u_{max} - u_{min}$ — декремент скорости поверхности (рис. 1), $H_{sp} = c_l\Delta t/2$ — толщина откольной пластины, где Δt — время циркуляции импульса сжатия в откольной пластине.

Таким образом, проведена регистрация экспериментальных профилей скорости свободной поверхности образцов высокопрочного α (52.3%) + β (47.7%) титанового сплава переходного класса VT22 толщиной от 0.4 до 10 mm. Путем анализа результатов измерений полных волновых профилей определен характер затухания упругого предвестника при его распространении по образцу — зависимость динамического предела упругости от пройденного волной расстояния. Показано, что

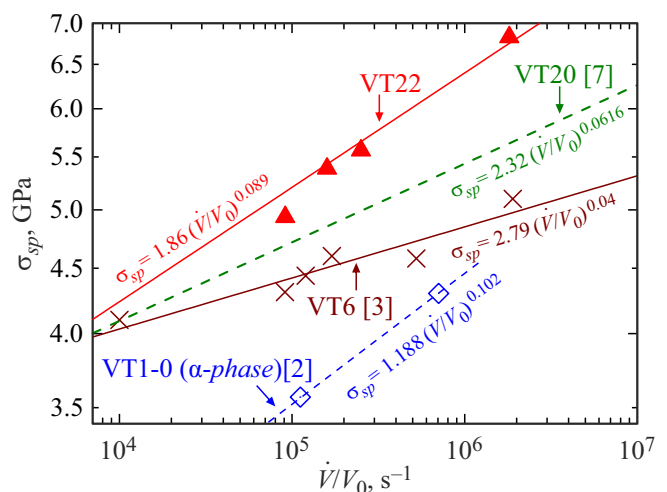


Рис. 3. Результаты измерения откольной прочности высокопрочного титанового сплава VT22 в зависимости от скорости расширения в падающей волне разрежения в сопоставлении с данными для технически чистого титанового сплава VT1-0 [2], VT6 [3] и VT20 [7]. Линии — аппроксимация экспериментальных данных.

Таблица 3. Условия экспериментов и результаты обработки волновых профилей

h , mm	H_{imp} , mm	H_{bp} , mm	U_s , m/s	σ_{max} , GPa	$u_{HEL(peak)}$, m/s	$u_{HEL(min)}$, m/s	Δu_{fs} , m/s	H_{sp} , mm
0.39	0.19	—	5312	9.3	371	303	496	0.18
1.99	0.95	1.92	5459	9.8	356	250	447	0.87
4.56	1.99	1.98	5485	9.4	321	263	420	1.75
9.65	2.02	1.99	5457	8.8	296	209	407	1.73

значения динамического предела упругости и откольной прочности высокопрочного титанового сплава ВТ22 превосходят значения, полученные для ВТ1-0, ВТ6 и ВТ20 при одинаковых условиях нагружения. Динамическая (откольная) прочность на разрыв в диапазоне скоростей деформирования от 10^4 до 10^6 s^{-1} титанового сплава ВТ22 варьируется от 4.95 до 6.3 GPa.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда „Экспериментальное исследование влияния температуры и структурного состояния на напряжения течения титановых сплавов при одномерном ударно-волновом нагружении,, (проект 25-29-00899, <https://rscf.ru/project/25-29-00899/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.Н. Климов, Д.М. Козлов, *Современные авиационные конструкционные сплавы* (Изд-во Самар. ун-та, Самара, 2017).
- [2] А.В. Павленко, А.В. Добромислов, Н.И. Талуц, С.Н. Малюгина, С.С. Мокрушин, ФММ, **122** (8), 851 (2021). DOI: 10.31857/S0015323021080106 [A.V. Pavlenko, A.V. Dobromyslov, N.I. Taluts, S.N. Malyugina, S.S. Mokrushin, Phys. Met. Metallogr., **122** (8), 794 (2021). DOI: 10.1134/S0031918X2108010X].
- [3] Г.И. Канель, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов, ЖТФ, **86** (8), 111 (2016). [G.I. Kanel, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov, Tech. Phys., **61**, 1229 (2016). DOI: 10.1134/S1063784216080132].
- [4] S. Wu, C. Zhou, Y. Shi, A. Hu, X. Xiao, Int. J. Impact Eng., **174**, 104493 (2023). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104493
- [5] Г.И. Канель, *Ударные волны в физике твердых тел* (Физматлит, М., 2018). [G.I. Kanel, *Shock wave in solid physics* (CRC Press, 2019). DOI: 10.1201/9780429275807].
- [6] L.M. Barker, R.E. Hollenbach, J. Appl. Phys., **43**, 4669 (1972). DOI: 10.1063/1.1660986
- [7] А.В. Павленко, С.Н. Малюгина, Д.Н. Казаков, С.С. Мокрушин, А.С. Майорова, О.Е. Козелков, С.Ю. Филатов, М.А. Борщевский, А.Е. Шестаков, А.С. Седов, А.В. Добромислов, Н.И. Талуц, *Ударно-волновые и реологические свойства титана и титановых сплавов* [Электронный ресурс]. <https://vniitf.ru/data/images/zst/2019/presents/sec-4/4-34ru.pdf>