

06

Влияние параметров ударно-волнового нагружения на деформацию и повреждение полого стального цилиндра

© В.О. Копытский, А.Ю. Малахов, И.В. Денисов, Е.В. Петров, Ф.Ф. Галиев, С.А. Серопян

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН,
Черноголовка, Московская обл., Россия
E-mail: kvo@ism.ac.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2025 г.

В окончательной редакции 17 января 2026 г.

Принято к публикации 19 января 2026 г.

Исследовано поведение полых цилиндров из коррозионно-стойкой стали 08X18H10T с преградой в виде компакта на основе порошка Ni–Al при ударном обжатии. Оценено влияние параметров ударно-волнового нагружения на степень обжатия цилиндров. Рассмотрены деформационные структуры, образующиеся в результате обжатия. Обнаружены следы продуктов синтеза NiAl внутри схлопнувшегося цилиндра на аномальном расстоянии от исходного положения компакта.

Ключевые слова: ударно-волновое нагружение, обжатие, откольные трещины, полосы локализованной деформации, скорость детонации, NiAl.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.09.62704.20528

Известно, что в результате природных и техногенных катастроф несущие и защитные конструкции могут подвергаться сильным ударам, взрывам и другим импульсным воздействиям. В результате таких воздействий материалы конструкций пластически деформируются под действием упругопластических или ударных волн. Для исследования влияния импульсных нагрузок на свойства конструкционных материалов используют методы ударно-волнового нагружения (УВН) [1–4].

УВН вызывает интенсивную пластическую деформацию кристаллической структуры материала благодаря высоким давлениям, создаваемым зарядом взрывчатого вещества (ВВ). Часто для исследований влияния УВН на материал используют цилиндрические оболочки из различных металлов [5–8]. Полное схлопывание цилиндрических оболочек без разрушения достигается при оптимальном подборе параметров заряда ВВ (массы, скорости детонации и давления детонации) и конфигурации экспериментальной сборки. Критическим условием является соответствие импульса нагрузки динамическому пределу прочности материала: при недостаточном импульсе оболочка не схлопывается полностью, а при избыточном происходит ее разрушение. Для обеспечения контролируемого схлопывания без потери целостности параметры заряда подбираются таким образом, чтобы к моменту завершения процесса деформации энергия ВВ была полностью поглощена материалом оболочки [7,8].

В работе [9] авторы использовали УВН цилиндрических ампул для инициирования самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и проведения экструзии порошковой смеси Ni–Al. В работах [10–13] УВН использовалось только для компактирования различных порошков. Исследования [10–14] показали, что в условиях высоких температур и давлений, характерных

для процессов УВН и СВС, порошковые смеси могут формировать интерметаллические соединения, среди которых самым распространенным является NiAl, обладающий высокой температурой плавления (1638 °C), твердостью, жаропрочностью и стойкостью к окислению и коррозии.

Актуальность настоящего исследования обусловлена важностью оптимизации параметров УВН для минимизации повреждаемости и максимизации упрочнения конструкционных материалов, а также перспективностью использования интерметаллидных систем типа NiAl для модификации свойств стальных элементов при динамических нагрузках.

Таким образом, исходя из имеющихся данных можно отметить, что в процессе компактирования или ударно-волнового синтеза порошковых смесей в цилиндрических ампулах особого внимания деформированной структуре материала цилиндра не уделялось. Также не рассматривалось влияние преграды в виде экзотермической смеси порошков (например, Ni–Al) на схлопывание полого цилиндра. С учетом изложенного выше и на основе результатов предыдущего исследования авторов [9] в настоящей работе была поставлена цель оценить влияние параметров УВН на формирование деформированных структур, а также определить характер деформационных процессов, происходящих в макро- и микроструктуре полого цилиндра с компактом из порошковой смеси внутри, после УВН. Для достижения этой цели были проведены металлографические исследования макро- и микроструктуры различных участков обжатого цилиндра.

Влияние параметров УВН на формирование структуры полого цилиндра исследовалось с помощью двух экспериментальных схем (рис. 1). Полые цилиндры

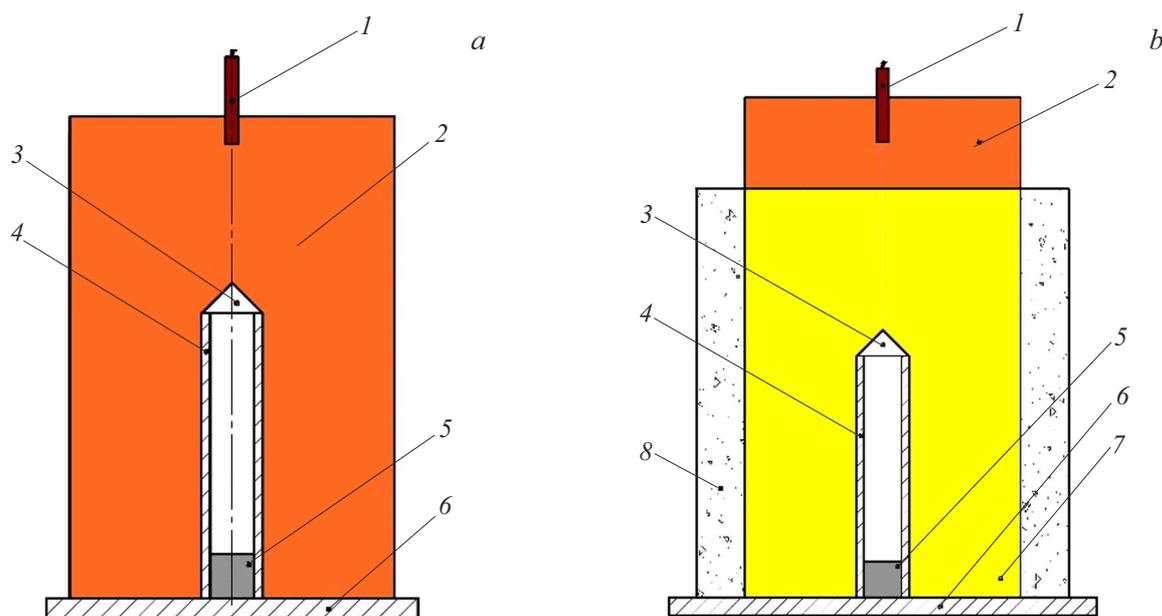


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. *a* — эксперимент 1, *b* — эксперимент 2. 1 — детонатор, 2 — аммонит 6ЖВ, 3 — обтекатель, 4 — цилиндр, 5 — Ni-Al, 6 — основа, 7 — игданит, 8 — песок.

(длина 70 mm) с толщиной стенки 2 mm и диаметром отверстия 10 mm были изготовлены из стали 08X18H10T. В первой схеме в качестве ВВ использовался аммонит 6ЖВ (скорость детонации 3750 m/s, давление детонации ВВ 3.5 GPa) (рис. 1, *a*). Во второй схеме (рис. 1, *b*) кроме аммонита использовалась смесь микропористой аммиачной селитры и дизельного топлива в соотношении 96:4 (скорость детонации 3150 m/s, давление детонации ВВ 1.88 GPa). Порошковая смесь состояла из никелевого порошка PNK-UT3 (с размером частиц $d \sim 18 \mu\text{m}$) и алюминиевого порошка ASD-1 ($d \sim 20 \mu\text{m}$) в эквимольном соотношении. Исходные порошки прессовались под действием одноосного давления в стальной пресс-форме, что позволило получить цилиндрические образцы с относительной плотностью примерно 65–70% от максимально возможного теоретического значения. Спрессованные таблетки диаметром 10 mm и высотой 10 mm помещались в нижнюю часть полого цилиндра. В первой схеме диаметр заряда ВВ составлял 70 mm, а во второй — 116 mm. Во второй схеме также использовался наружный слой из песка, который снижал металательную способность ВВ за счет диссипации энергии ударной волны.

Эксперименты показали, что компакт смеси оказывает влияние на деформационное поведение полого стального цилиндра в установке. Исследуемые сечения обжатых образцов представлены на рис. 2. На каждом образце было рассмотрено три поперечных сечения: I — верхнее в начале обжатия, II — среднее в середине образца, III — нижнее в конце обжатия, непосредственно над компактом.

На рис. 2, *a* представлены изображения сечений образца № 1. На сечении I наблюдаются четыре радиальные

трещины, изогнутые в одном направлении и достигающие свободной поверхности цилиндра, которые имеют деформационно-сдвиговую природу. В центральной области вокруг отверстия диаметром 0.2 mm зафиксирована сетка полос локализованной деформации. Кривизна трещин и их ориентация свидетельствуют о значительной роли сдвиговой деформации, вызванной асимметричным воздействием детонационной волны. На сечении II внутри отверстия диаметром 0.8 mm обнаружены дисперсные частицы, которые по данным последующего анализа методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), показали anomalно высокое содержание никеля и алюминия. На сечении III также идентифицированы радиальные трещины, исходящие из отверстия диаметром 1.6 mm, но не достигающие свободной поверхности. Их формирование связано с действием растягивающих напряжений, возникающих при взаимодействии встречных волн разгрузки [15,16].

На рис. 2, *b* представлены сечения образца № 2. На сечении I отверстие отсутствует, сохранились лишь следы интенсивной пластической деформации в осевой зоне с характерными полосами локализации. На сечении II зафиксировано отверстие диаметром 0.3 mm с радиальными трещинами, также демонстрирующими тенденцию к искривлению. При локализации деформации откольные трещины часто распространяются по полосам локализованного сдвига, которые ориентированы под углами, близкими к 45° , к направлению максимальных касательных напряжений. Внутренняя полость не содержит частиц, обогащенных никелем и алюминием. На сечении III наблюдается отверстие со средним диаметром 1.0 mm с включениями деформированного материала. В отличие от образца № 1 отсутствуют

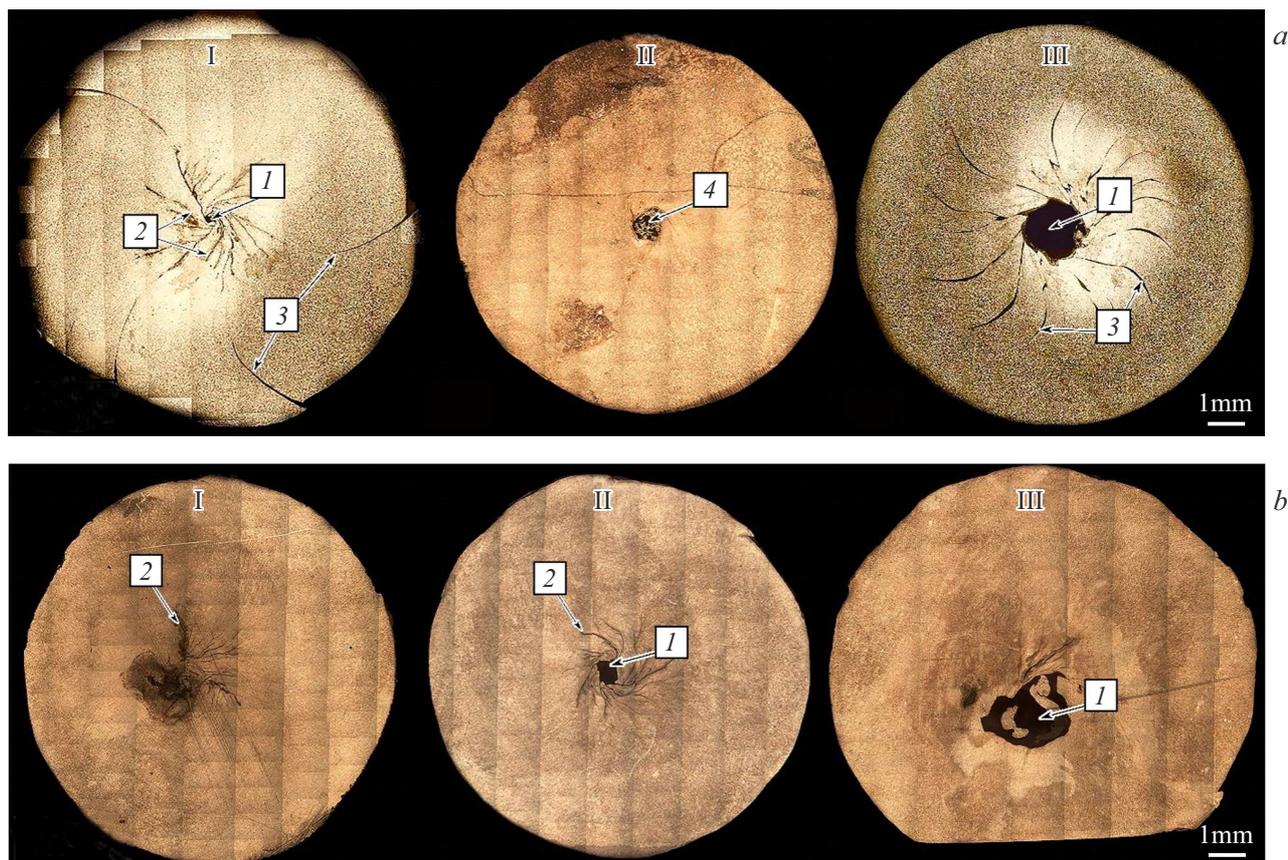


Рис. 2. Оптические изображения поперечных шлифов образцов № 1 (а) и 2 (б). 1 — отверстие, 2 — полосы локализованной деформации, 3 — радиальные трещины, 4 — NiAl. Римскими цифрами обозначены различные сечения (пояснение в тексте).

ярко выраженные трещины, выходящие на наружную поверхность, а диаметры отверстий на всех сечениях существенно меньше. Толщина стенок в обоих случаях увеличилась в 2.5 раза (с 2 до 5 мм). Несмотря на наличие преграды, характер повреждений качественно соответствует картине, наблюдаемой при обжатии цилиндров без преграды при схожих параметрах нагружения [17], что указывает на доминирующую роль параметров ударного воздействия над влиянием преграды в данных экспериментальных условиях.

На рис. 3 и в таблице представлены результаты ЭДС-анализа состава продуктов, обнаруженных в отверстии образца № 1 на сечении II. В различных частицах наблюдается разное соотношение Ni/Al, а также присутствует железо из материала оболочки, что свидетельствует об интенсивном механическом перемешивании. ЭДС-анализ и рентгенофазовый анализ (РФА) (рис. 4), которые показали наличие фаз NiAl и Ni₃Al, подтверждают наличие следов интерметаллидов NiAl, несмотря на то что сечение удалено на расстояние 20 мм от спрессованного компакта смеси Ni–Al и процесс сжатия стенок цилиндра происходит до того, как сжатие дойдет до преграды в виде компакта. Однако в процессе сжатия происходит массоперенос, что связано с выбросом частиц порошка под действием ударной волны, их

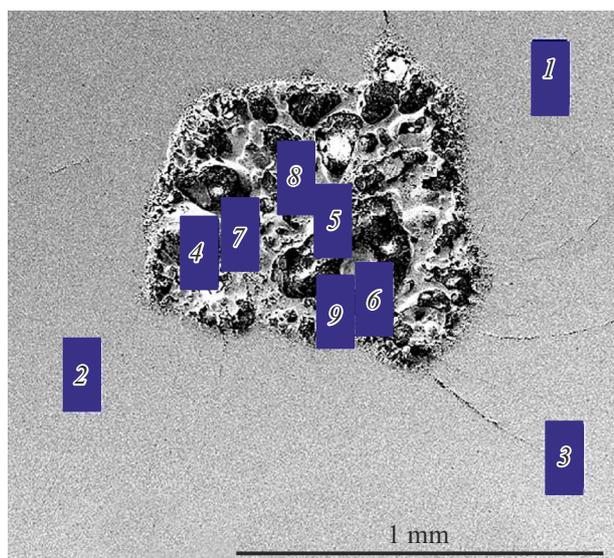


Рис. 3. Полученное методом сканирующей электронной микроскопии изображение структуры отверстия сечения II образца № 1. Цифрами 1–9 обозначены энергодисперсионные спектры.

взаимодействия с деформируемой стальной матрицей и возможного плавления из-за локального адиабатического нагрева. Возможность образования интерметаллидов в результате УВН была также доказана в предыдущей работе [9]. Определение наличия интерметаллидов NiAl на других сечениях внутри цилиндров является целью дальнейших исследований.

Обжатие полых цилиндров из коррозионно-стойкой стали привело к образованию почти сплошных цилиндрических образцов. В результате металлографических исследований установлено, что образец № 1 обладает большей откольной повреждаемостью и большими диаметрами оставшихся отверстий, чем образец № 2. Результаты эксперимента показали, что при воздействии скользящей детонационной волны на полый цилиндр формируется ударная волна, распространяющаяся внутрь материала. За фронтом ударной волны следует волна разгрузки, которая создает растягивающие напряжения в предварительно сжатом материале. Наблюдаемое различие степени сжатия вдоль оси цилиндра однозначно связано с разными параметрами УВН. Повреждаемость материала (откольные трещины) формируется преимущественно на стадии разгрузки, когда действие сжимающих напряжений завершается [15,16].

Таким образом, установлено, что увеличение длительности импульсного нагружения за счет помещения экспериментальной сборки в слой песка приводит к значительному снижению повреждаемости материала. Показано, что в образце № 2 с увеличенной длительностью нагружения наружная поверхность сохраняет целостность, а количество радиальных откольных трещин в околоосевой области сокращается. Обнаружено, что даже при снижении импульсного воздействия в данных условиях не происходит полного обжатия цилиндра в сечениях вблизи компакта: сохраняются отверстия уменьшенного диаметра. Также зафиксировано anomальное распределение продуктов синтеза NiAl на расстоянии до 20 mm от исходного положения компакта.

Наблюдаемое anomальное распределение продуктов синтеза NiAl свидетельствует о сложных физико-химических процессах, требующих дополнительного ис-

Данные ЭДС (в at.%) по спектрам, обозначенным на рис. 3

Номер спектра	Al	Ti	Cr	Fe	Ni
1	1.51	1.38	18.64	68.43	10.04
2	1.42	1.21	19.63	68.35	9.39
3	1.62	1.20	18.01	68.85	10.32
4	13.95	1.59	8.22	66.88	9.36
5	1.07	0.36	18.43	70.71	9.43
6	33.49	0.82	5.74	19.64	40.31
7	35.42	0.57	21.38	39.38	3.25
8	57.59	0.14	16.97	24.42	0.88
9	50.03	0.19	11.97	25.62	12.19

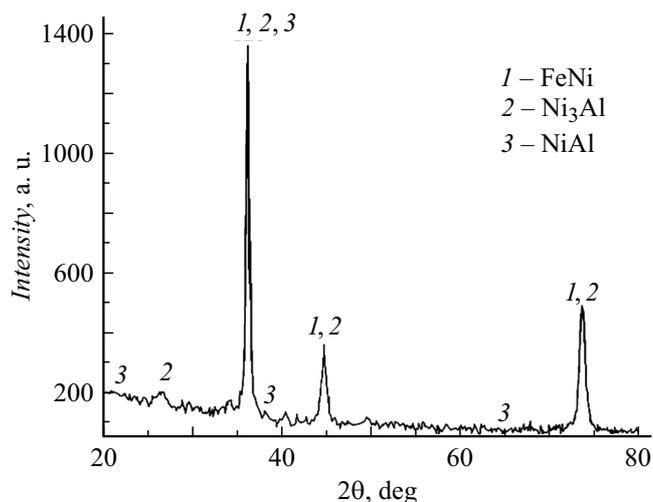


Рис. 4. Дифрактограмма (РФА) центральной области сечения II образца № 1.

следования механизмов миграции и синтеза интерметаллидов. Полученные результаты важны для разработки методов управления структурой и свойствами материалов при динамическом нагружении.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСМАН (№ 125021201986-5).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.Г. Бродова, В.И. Зельдович, И.В. Хомская, ФММ, **121** (7), 696 (2020). DOI: 10.31857/S0015323020070025 [I.G. Brodova, V.I. Zel'dovich, I.V. Khomskaaya, Phys. Met. Metallogr., **121** (7), 631 (2020). DOI: 10.1134/S0031918X20070029].
- [2] S. Yu, G. Zhang, H. Wu, Z. Wang, J. Yao, Q. Sun, M. Wang, Y. He, Eng. Struct., **285**, 115986 (2023). DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115986
- [3] С.В. Разоренов, А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, Р.Ф. Муфтахетдинова, И.В. Хомская, Г.А. Яковлев, В.А. Хотинков, В.И. Гроховский, ЖТФ, **94** (6), 863 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58127.87-24 [S.V. Razorenov, A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, R.F. Muftakhedinova, I.V. Khomskaaya, G.A. Yakovlev, V.A. Khotinov, V.I. Grokhovsky, Tech. Phys., **69** (6), 803 (2024). DOI: 10.61011/TP.2024.06.58822.87-24].
- [4] И.А. Черепанов, А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов, ЖТФ, **94** (1), 125 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56910.247-23 [I.A. Cherepanov, A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov, Tech. Phys., **69** (1), 119 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56910.247-23].

- [5] С.Н. Буравова, Е.В. Петров, А.С. Шукин, *Физика горения и взрыва*, **52** (5), 131 (2016). DOI: 10.15372/FGV20160512 [S.N. Buravova, E.V. Petrov, A.S. Shchukin, *Combust. Explos. Shock Waves*, **52** (5), 613 (2016). DOI: 10.1134/S0010508216050129].
- [6] Е.А. Козлов, С.А. Бричников, Д.С. Боярников, Д.П. Кучко, А.А. Дегтярев, *ФММ*, **112** (4), 412 (2011). [E.A. Kozlov, S.A. Brichikov, D.S. Boyarnikov, D.P. Kuchko, A.A. Degtyarev, *Phys. Met. Metallogr.*, **112** (4), 389 (2011). DOI: 10.1134/S0031918X11040259].
- [7] В.И. Зельдович, Н.Ю. Фролова, А.Э. Хейфец, И.В. Хомская, А.А. Дегтярев, Е.В. Шорохов, Е.Б. Смирнов, С.М. Долгих, А.В. Коваль, *Физика горения и взрыва*, **55** (4), 92 (2019). DOI: 10.15372/FGV20190412 [V.I. Zel'dovich, N.Yu. Frolova, A.E. Kheifets, I.V. Khomskaya, A.A. Degtyarev, E.V. Shorokhov, E.B. Smirnov, S.M. Dolgikh, A.V. Koval', *Combust. Explos. Shock Waves*, **55** (4), 456 (2019). DOI: 10.1134/S0010508219040129].
- [8] А.В. Коваль, И.Г. Ширинкина, А.Н. Петрова, И.Г. Бродова, Е.Б. Смирнов, Е.В. Шорохов, *Физика горения и взрыва*, **55** (4), 82 (2019). DOI: 10.15372/FGV20190411 [A.V. Koval', I.G. Shirinkina, A.N. Petrova, I.G. Brodova, E.B. Smirnov, E.V. Shorokhov, *Combust. Explos. Shock Waves*, **55** (4), 447 (2019). DOI: 10.1134/S0010508219040117].
- [9] A. Malakhov, D. Shakhray, I. Denisov, F. Galiev, S. Seropyan, *Materials*, **15** (17), 6062 (2022). DOI: 10.3390/ma15176062
- [10] O.V. Ivanova, S.A. Zelepugin, *Appl. Mech. Mater.*, **770**, 174 (2015). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.174
- [11] N.A. Adamenko, L.N. Ignatieva, G.A. Zverev, G.V. Agafonova, V.A. Mashchenko, *J. Fluor. Chem.*, **249**, 109852 (2021). DOI: 10.1016/j.jfluchem.2021.109852
- [12] S.A. Zelepugin, O.V. Ivanova, A.S. Yunoshev, A.S. Zelepugin, *Lett. Mater.*, **5** (4), 468 (2015). DOI: 10.22226/2410-3535-2015-4-468-472
- [13] K.L. Olney, P.H. Chiu, A. Higgins, M. Serge, T.P. Weihs, G. Fritz, A. Stover, D.J. Benson, V.F. Nesterenko, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **500**, 132002 (2014). DOI: 10.1088/1742-6596/500/13/132002
- [14] M. Sun, C. Li, X. Zhang, X. Hu, X. Hu, Y. Liu, *Materials*, **11** (11), 2267 (2018). DOI: 10.3390/ma11112267
- [15] S.N. Buravova, E.V. Petrov, *Forces Mech.*, **3**, 100015 (2021). DOI: 10.1016/j.fimnec.2021.100015
- [16] А.Ф. Беликова, С.Н. Буравова, Ю.А. Гордополов, *ЖТФ*, **83** (2), 153 (2013). [A.F. Belikova, S.N. Buravova, Yu.A. Gordopolov, *Tech. Phys.*, **58** (2), 302 (2013). DOI: 10.1134/S1063784213020035].
- [17] В.Ф. Нестеренко, М.П. Бондарь, *Физика горения и взрыва*, **30** (4), 99 (1994). [V.F. Nesterenko, M.P. Bondar', *Combust. Explos. Shock Waves*, **30** (4), 500 (1994). DOI: 10.1007/BF00790157].