

Исследование структуры и свойств

Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-6-35-41>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА БРОНЗОВЫХ СПЛАВОВ БрАЖ9-4 И БрАМц9-2

© **Владислав Олегович Копытский***, **Евгений Владимирович Петров**

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А. Г. Мержанова РАН, Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 8; *e-mail: kvo@ism.ac.ru

*Статья поступила 14 сентября 2022 г. Поступила после доработки 25 октября 2022 г.
Принята к публикации 20 февраля 2023 г.*

Бронзовые сплавы благодаря своей устойчивости к механическому истиранию и высокой коррозионной стойкости применяют для изготовления деталей машин и механизмов, испытывающих трение в процессе эксплуатации. В работе представлены результаты исследования ударно-волнового нагружения на структуру и свойства бронзовых сплавов марок БрАЖ9-4 и БрАМц9-2. Эксперименты по ударно-волновому нагружению проводили методами метания пластины-ударника на цилиндрические образцы и обжатия скользящей детонационной волной. Метод метания пластины-ударника, разогнанной энергией взрыва, часто используют для определения откольной прочности материалов, метод обжатия скользящей детонационной волной — для создания больших динамических давлений внутри материала. Показано, что при скорости метания пластины-ударника 2,4 км/с давление соударения пластины с образцом составляет 15 – 16 ГПа, что превышает откольную прочность бронзы. При таких условиях нагружения твердость бронзы повышается на 53 и 25 % для БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 соответственно. Исследования микроструктуры с помощью сканирующей электронной и оптической микроскопии выявили множественные трещины и микропоры на поверхности поперечных шлифов, формирующие зону откольного разрушения и области, переходящие в полосы локализованной деформации. Кроме того, установлено, что при нагружении пластиной-ударником образцов в обойме и без нее наблюдается большее количество трещин и областей сдвига. В случае обжатия скользящей детонационной волной с разной величиной заряда взрывчатого вещества отмечены небольшие дефекты в структуре у границ зерен. Полученные результаты могут быть использованы для создания технологий модификации и восстановления свойств бронзовых деталей, подверженных ударно-волновому разрушению.

Ключевые слова: бронзовые сплавы; ударная волна; пластическая деформация; микроструктура; откольное разрушение.

STUDY OF THE EFFECT OF SHOCK WAVE LOADING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF BRONZE ALLOYS BrAZh9-4 AND BrAMts9-2

© **Vladislav O. Kopytskiy***, **Evgeny V. Petrov**

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, RAS, 8, ul. Academica Osipyana, Chernogolovka, Moscow obl., 142432, Russia; *e-mail: kvo@ism.ac.ru

Received September 14, 2022. Revised October 25, 2022. Accepted February 20, 2023.

Bronze alloys, due to their resistance to mechanical abrasion and high corrosion resistance, are used for the manufacture of machine parts and mechanisms that are subject to friction during operation. We present the results of studying the effect of shock-wave loading on the structure and properties of bronze alloys of grades BrAZh9-4 and BrAMts9-2. Shock-wave loading experiments were carried out by throwing

the flyer plate onto cylindrical samples and compressing by a sliding detonation wave. The method of throwing a flyer plate accelerated by the energy of an explosion is often used to determine the spall strength of materials and the method of compression by a sliding detonation wave is used to create a large dynamic pressure inside the material. It is shown that at a throwing speed of a flyer plate of 2.4 km/sec, the impact pressure of the plate with the sample is 15 – 16 GPa, which exceeds the bronze shear strength. Under indicated loading conditions, the hardness of bronze increases by 53 and 25% for BrAZh9-4 and BrAMts9-2, respectively. Studies of the microstructure using scanning electron and optical microscopy revealed multiple cracks and micropores present on the surface of transverse sections forming a zone of spall fracture and areas turning into bands of localized deformation. Moreover, it is shown that when the samples are loaded with a flyer plate in a clip and without it, a greater number of cracks and shear areas are observed. Compression by a sliding detonation wave with a different amount of explosive charge revealed small defects present in the structure at the grain boundaries. The results obtained can be used to develop technologies for modifying and restoring the properties of bronze parts subject to shock-wave destruction.

Keywords: bronze alloys; shock wave; plastic deformation; microstructure; spall fracture.

Введение

Бронзовые сплавы широко используют в судо- и машиностроении для изготовления деталей, работающих в условиях сильного трения и коррозии (корпусов насосов, гребных винтов, клапанов, труб теплообменников и др.). Отметим, что сплавы БрАЖ9-4 и БрАМц9-2, обладающие высокой устойчивостью к механическому истиранию и коррозионной стойкостью в морской воде, служат основным материалом для производства гребных винтов, наиболее распространенная проблема которых — разрушение откольного типа в результате воздействия кавитационной эрозии [1 – 7]. При этом процесс развития разрушения материала при воздействии кавитационной эрозии можно рассмотреть с точки зрения воздействия ударных волн, образующихся при разрыве паровых пузырьков в жидкости [8 – 13].

Ударно-волновое нагружение — распространенный способ высокоэнергетического воздействия на металлы и сплавы. Влияние ударных волн на материал создает значительное повышение его прочности. При детонации взрывчатого вещества (ВВ) ударные волны распространяются навстречу и под углами друг к другу, создавая высокие давления. Структура металлов и сплавов при ударно-волновом нагружении неизбежно подвергается изменению, и на это влияют несколько факторов: высокое давление, высокоскоростная деформация, растягивающие напряжения при разгрузке, повышение температуры [14]. Однако нагружение ударными волнами зачастую сопровождается разрушением материала.

Поскольку бронза — сплав на основе меди, при воздействии ударных волн от энергии взрыва она не испытывает фазовых превращений. Поведение бронзовых материалов принято считать классически гидродинамическим, так как отсутствует предвестник разрушения [15].

Основной механизм развития пластической деформации в бронзе с поликристаллической структурой — скольжение. Двойникование в

структуре бронзы при высокоскоростной пластической деформации играет второстепенную роль. Нагружение медных сплавов ударными волнами с давлением до 25 ГПа не меняет их внутреннюю микроструктуру [16]. Вместе с тем при данном уровне импульсной нагрузки может наблюдаться образование откольной повреждаемости и полос локализованной деформации, а также зарождение пор внутри полос локализованной деформации. Это происходит во время распространения волн разгрузки, когда ударные волны выходят на свободные поверхности образца. Волны разгрузки создают в материале области больших растягивающих напряжений, превышающих его динамическую прочность, тем самым образуя микропоры.

В настоящее время накоплено достаточно экспериментальных данных (поры внутри полос сдвига, их распространение по недеформированному материалу, отсутствие надежного экспериментального подтверждения разупрочнения), противоречащих традиционной термопластической модели описания локализации деформации при ударно-волновом нагружении бронзы [15]. Кроме того, термопластическая модель не позволяет оценить возникновение локализации деформации в узких полосах, когда соседний материал не деформируется. Поэтому за основу приняли откольную модель. Заметим, что сведения о процессах развития откольного разрушения при ударно-волновом нагружении бронзовых сплавов в литературе отсутствуют.

Цель работы — исследование микроструктуры и микротвердости бронзовых сплавов после ударно-волнового нагружения, вызывающего образование откольных трещин и полос локализованной деформации.

Материалы, методика, оборудование

Ударно-волновое нагружение образцов из бронзы осуществляли двумя способами: с помощью метания пластины-ударника и обжатия

скользящей детонационной волной (рис. 1). Метание пластины-ударника широко используют для определения динамической прочности материалов, обжатие скользящей детонационной волной — для создания высоких давлений по всей площади соприкосновения ВВ с образцом.

Исследуемые образцы из марок бронзы БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 имели цилиндрическую форму (высота — 40 мм, диаметр — 25 мм). В качестве ВВ использовали аммонит 6ЖВ (скорость детонации — 3600 – 4800 м/с). Химический состав бронзы представлен в таблице.

В качестве пластины-ударника применяли алюминиевую пластину из сплава марки Д16 (высота — 2 мм, диаметр — 45 мм, масса — 10 г). На пластину устанавливали заряд ВВ насыпной плотности (высота заряда — 55 мм, масса — 75 г). Образец помещали в обойму из нержавеющей стали цилиндрической формы (диаметр — 45 мм). Проводили также испытания без обоймы. Обжатие скользящей детонационной волной осуществлялось насыпным зарядом аммонита 6ЖВ (высота заряда — 45 мм, высота заряда по боковым граням — 30 мм, масса заряда — 290 г). Кроме того, эксперименты по обжатию проводили с высотой заряда по боковым граням 40 мм (масса заряда — 490 г).

После экспериментов образцы подготавливали для металлографических исследований путем изготовления из них продольных шлифов (относительно направления распространения ударных волн от точки детонации). Микроструктуру шлифов исследовали на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55 и оптическом микроскопе МЕТАМ ЛВ-34. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г.

Обсуждение результатов

Скорость метания пластины-ударника рассчитывали с использованием формулы Гарни [17]:

$$V = \sqrt{2E_G} \frac{r\sqrt{3}}{\sqrt{r^2 + 5r + 4}}, \quad (1)$$

где r — отношение массы ВВ к массе метаемой пластины; E_G — энергия Гарни, ее значения из-

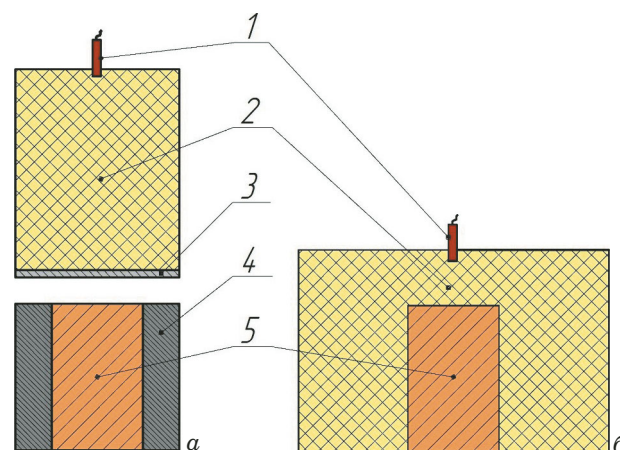


Рис. 1. Схемы испытаний: а — метание пластины-ударника; б — обжатие скользящей детонационной волной (1 — детонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — пластина-ударник; 4 — обойма; 5 — образец)

Fig. 1. Experimental schemes: а — throwing of the flyer plate; б — compression by a sliding detonation wave (1 — detonator; 2 — explosive charge; 3 — flyer plate; 4 — clip; 5 — sample)

вестны для различных типов ВВ (для аммонита 6ЖВ $\sqrt{2E_G} = 1,83$ км/с).

Рассчитанная по (1) скорость V составила 2,4 км/с. Это максимальная скорость, которая может быть достигнута до столкновения пластины с образцом.

По скорости метания пластины-ударника можно определить испытываемое образцом давление при соударении. Давление при соударении образца с пластиной-ударником оценивали по формуле [18]

$$p_k = \frac{\rho_2 v_0^2}{\sqrt{1 - \rho_2/\rho'_2} + \sqrt{(1 - \rho_1/\rho'_1)\rho_2/\rho'_2}}, \quad (2)$$

где v_0 — скорость соударения; ρ_1 , ρ_2 и ρ'_1 , ρ'_2 — начальные плотности пластин и плотности при давлении p_k .

Формула (2) используется в случае нормального соударения при сварке взрывом двух пластин, когда в момент удара пластины соприкасаются по всей площади одновременно и от контактной поверхности распространяются плоские ударные волны, что подходит и для данного эксперимента.

Рассчитать давление соударения пластины-ударника с бронзовой преградой можно, если за-

Химический состав бронз, %

Chemical composition of bronzes, %

Сплав	Al	Fe	Ni	Zn	Mn	Cu
БрАЖ9-4	8,2	2,5	—	0,05	—	Ост.
БрАМц9-2	8,7	0,35	0,46	0,26	1,6	Ост.

даны скорость v_0 и уравнение состояния металлов. Ударные адиабаты известны для большинства металлов в диапазоне давлений до 400 ГПа. Отметим, что уравнения состояния металлов имеют в некоторой точке p излом, соответствующий переходу среды из упругого в пластическое состояние.

Уравнения состояния металлов для пластины-ударника и преграды имеют следующий вид:

$$p = A_1 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{n_1} - 1 \right], \quad p = A_2 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_2} \right)^{n_2} - 1 \right], \quad (3)$$

где A_1, A_2 — постоянные размерности давления; n_1, n_2 — безразмерные константы.

Давление соударения пластины-ударника с бронзовым образцом, рассчитанное по формулам (2) и (3), составило 15 – 16 ГПа. Заметим, что это значение в несколько раз превышает откольную прочность бронзы.

Микротвердость определяли на поперечных шлифах образцов. Результаты измерений показали отсутствие разницы в изменении микротвердости в зависимости от удаления от поверхности соударения с пластиной-ударником. По сравнению с микротвердостью в исходном состоянии ее значение после ударного нагружения

в бронзах БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 увеличилось на 53 и 25 % соответственно (для БрАЖ9-4 исходная микротвердость — 190 HV, после соударения — 290 HV; для БрАМц9-2 исходная микротвердость — 180, после соударения — 225 HV).

После ударно-волнового нагружения образцов (при металлографическом исследовании) выявили большое количество образовавшихся трещин. При ударе пластиной находящиеся в обойме образцы из БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 не изменили свою форму, но приобрели множественные видимые дефекты в структуре. Микротрещины отличались высокой дискретностью и наличием большого количества пор по сравнению с образцами после обжатия.

На рис. 2 приведены травленные поверхности шлифов сплавов БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 после метания пластины-ударника на образцы в обойме. В микроструктуре БрАЖ9-4 прослеживается формирование небольших участков с полосами сдвига, а микроструктура БрАМц9-2 отличается большим количеством образовавшихся полос. Характер деформационной структуры свидетельствует о том, что высокоскоростная пластическая деформация бронзы на макроуровне осуществляется скольжением, причем наличие в структуре грубых следов скольжения указывает на повышенную локализацию пластической деформации.

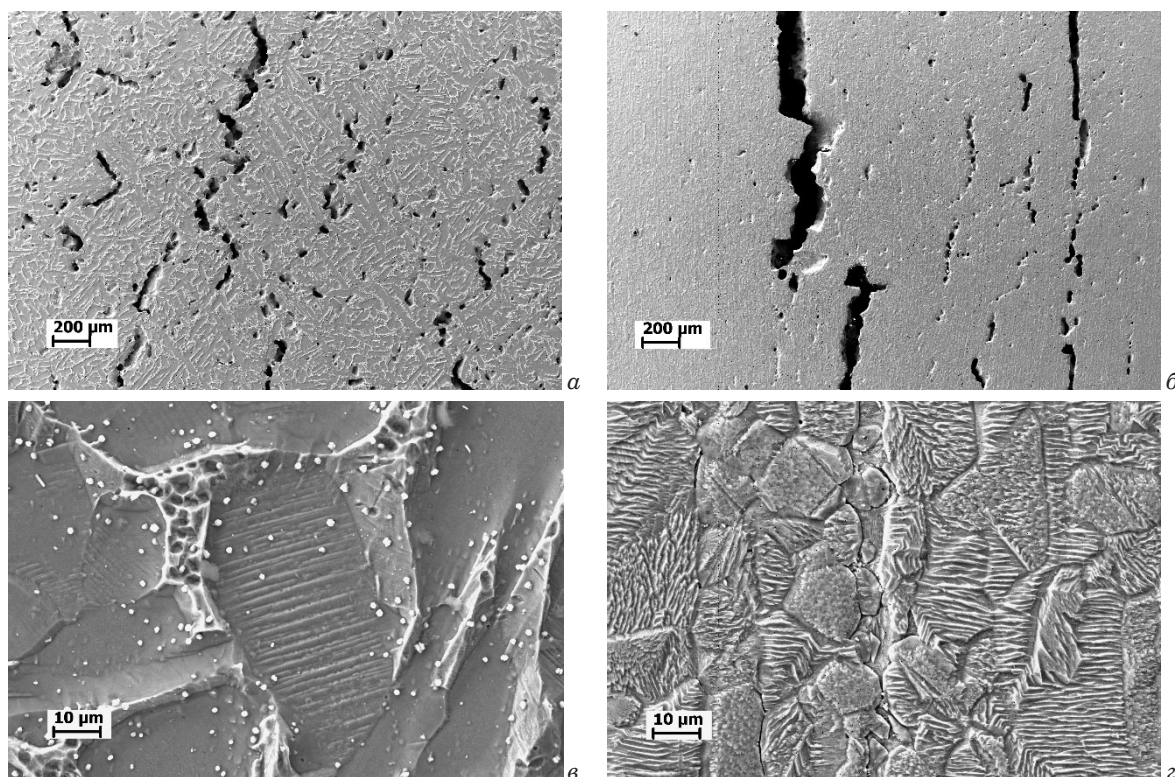


Рис. 2. Травленные поверхности шлифов сплавов БрАЖ9-4 (а, в) и БрАМц9-2 (б, г) после метания пластины-ударника на образцы в обойме

Fig. 2. Etched surfaces of grinding alloys BrAZh9-4 (a, c) and BrAMts9-2 (b, d) after throwing the flyer plate onto the samples in the clip

ции. Одновременное действие нескольких систем скольжения в одном зерне в условиях ударного нагружения указывает на то, что приведенное сдвиговое напряжение достигает критического значения в нескольких системах независимо от величины в них фактора Шмида [19].

При ударе алюминиевой пластиной-ударником по образцам бронзы без обоймы цилиндры меняли форму в верхней части, на которую приходился удар, на «грибовидную» (рис. 3). На шлифах также фиксировали большое количество видимых трещин, расположенных вдоль направления распространения ударной волны.

Отметим, что трещины распространяются не только по «уязвимым» местам зеренной структуры, т.е. вдоль ее границ, но и вдоль самих зерен, что свидетельствует о более сильном нагружении пластиной при соударении с образцами без обоймы. Структура шлифов отличается большим количеством микропор гораздо больших размеров (до 60–70 мкм) рядом с трещинами (рис. 4). Однако плоская ударная волна, проходящая че-



Рис. 3. Сохраненные образцы бронзы после соударения с пластиной-ударником без обоймы

Fig. 3. The preserved bronze samples after the impact of the flyer plate without a clip

рез материал бронзы, не меняет ее зеренную микроструктуру, размер и форма зерен в сравнении с микроструктурой исходных образцов остаются прежними.

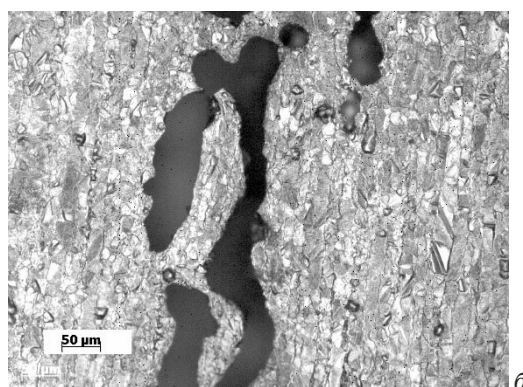
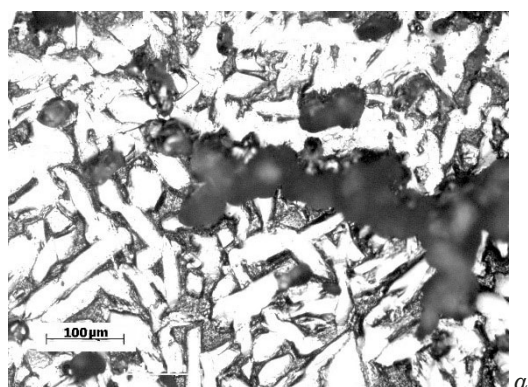


Рис. 4. Травленные поверхности шлифов сплавов БрАЖ9-4 (а) и БрАМц9-2 (б) после метания пластины-ударника на образцы без обоймы, полученные на оптическом микроскопе

Fig. 4. Etched surfaces of grinding alloys BrAZh9-4 (a) and BrAMts9-2 (b) after throwing the flyer plate onto the samples without a clip (optical microscopy)

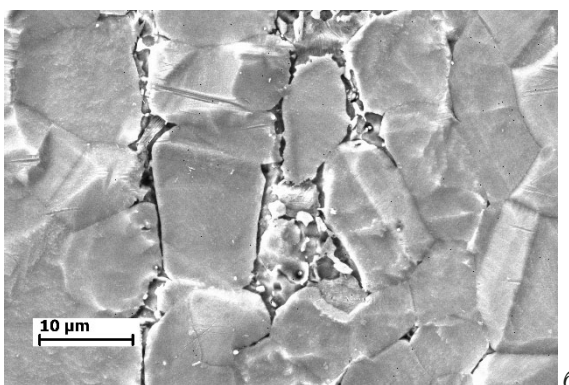
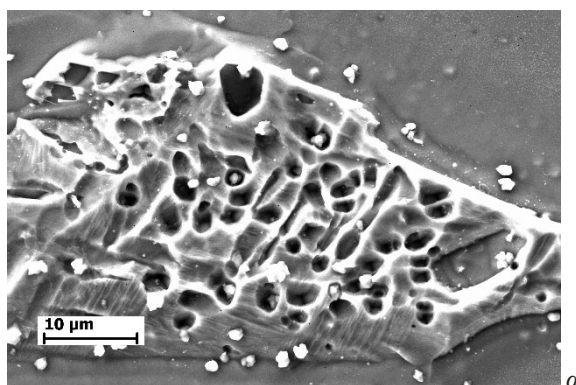


Рис. 5. Травленные поверхности шлифов сплавов БрАЖ9-4 (а) и БрАМц9-2 (б) после обжатия скользящей детонационной волной (заряд ВВ — 290 г)

Fig. 5. Etched surfaces of grinding alloys BrAZh9-4 (a) and BrAMts9-2 (b) after compression by a sliding detonation wave (explosive charge — 290 g)

После обжигания скользящей детонационной волной образцы с зарядами ВВ 290 и 490 г остались сплошными. Нагружение образцов ударными волнами с разных сторон и разной величиной напряжений не привело к образованию множественных откольных трещин. Ударные волны, проходящие через сплошной цилиндрический образец, распространялись навстречу друг к другу и гасились вследствие отсутствия свободных поверхностей. Преимущественно, фиксировали наличие микропор в областях границ зерен и небольших микроразрывов вдоль границ в микроструктуре БрАМц9-2 (рис. 5).

Из металлографических испытаний можно сделать вывод о развитии разрушений при разных методах и уровнях нагружения. Разрушение — следствие взаимодействия прямой и обратной волн разгрузки, отраженных от свободных поверхностей, и при их отсутствии, как в случае обжигания образцов скользящей детонационной волной, вне зависимости от величины заряда ВВ это приводит только к образованию микропор и небольших микроразрывов. При наличии свободных поверхностей у образцов в случае метания пластины-ударника на образцы в обойме или без нее формируются микротрещины из разрозненных микроразрывов, которые, как правило, развиваются из микропор. Тем самым микропоры дают начало распространению микротрещин при напряжениях, достигающих некоторой критической величины. Во всех случаях обнаруженные микротрещины образуются параллельно свободным поверхностям и располагаются на разных от них расстояниях, формируя зону откольного разрушения.

Заключение

Проведенные исследования показали, что под действием ударно-волнового нагружения при метании пластины-ударника и обжигания скользящей детонационной волной происходит сильная локализация пластической деформации, приводящая к большому количеству микротрещин и следов скольжения. Неэквивалентные полосы сдвига в отдельных зернах указывают на то, что в процессе взрывного нагружения критическое напряжение сдвига одновременно достигается в нескольких системах. Наряду со сдвигом образование множественных трещин — основной механизм высокоскоростной пластической деформации, формирующий в бронзе зоны откольного разрушения. Установлено, что при метании алюминиевой пластины-ударника рассчитанное давление соударения (15–16 ГПа) превышает откольную прочность бронзы. При этом упрочнение материала характеризуется повышением

твердости на 53 и 25 % для БрАЖ9-4 и БрАМц9-2 соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sabbaghzadeh B., Parvizi R., Davoodi A., Moyaed M. Corrosion evaluation of multi-pass welded nickel-aluminum bronze alloy in 3.5% sodium chloride solution: A restorative application of gas tungsten arc welding process / *Materials and Design*. 2014. N 58. P 346 – 356. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.019
2. Lotfollahi M., Shalamanian M., Saatchi A. Effect of friction stir processing on erosion-corrosion behavior of nickel-aluminum bronze / *Materials and Design*. 2014. N 62. P 282 – 287. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.05.037
3. Qin Z., Luo Q., Zhang Q., et al. Improving corrosion resistance of nickel-aluminum bronzes by surface modification with chromium ion implantation / *Surface & Coatings Technology*. 2018. N 334. P 402 – 409. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.066
4. Li Y., Liang Y., Sun Y. Cavitation erosion behavior of friction stir processed nickel aluminum bronze / *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. N 795. P 233 – 240. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.302
5. Sun Y., Wang H., Liu W., et al. Improvement of surface resistance to cavitation corrosion of nickel aluminum bronze by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling process / *Surface & Coatings Technology*. 2019. N 368. P 215 – 223. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.03.045
6. Цветков Ю. Н., Горбаченко Е. О. Особенности изменения профиля поверхности алюминиевых бронз при кавитационном изнашивании в морской воде / *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2018. Т. 10. № 5. С. 1004 – 1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1004-1014
7. Кузьмин Д. А. Влияние эрозии-коррозии на развитие трещин в сварных соединениях оборудования или трубопроводов АЭС / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021. Т. 87. № 3. С. 58 – 63. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-3-58-63
8. Cottam R., Luzin V., Moody H., et al. The role of microstructural characteristics in the cavitation erosion behavior of laser melted and laser processed Nickel-Aluminium Bronze / *Wear*. 2014. N 317. P 56 – 63. DOI: 10.1016/j.wear.2014.05.002
9. Qin Z., Li X., Xia D., et al. Effect of compressive stress on cavitation erosion-corrosion behavior of nickel-aluminum bronze alloy / *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. N 89. P 106143. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106143
10. Zhang S., Qian Z., Ji B. Estimation of cavitation erosion area in unsteady cavitating flows using a modified approach / *Ocean Engineering*. 2022. N 262. P 112229. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112229
11. Буравова С. Н. Повреждаемость поверхности при кавитационной эрозии / *Журнал технической физики*. 1998. Т. 68. № 9. С. 110 – 114.
12. Таранов Д. К., Федюк Р. С. Методы защиты от кавитационной эрозии / *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. Т. 111. № 9. С. 54 – 59. DOI: 10.23670/IRJ.2021.9.111.008
13. Цветков Ю. Н., Горбаченко Е. О. Исследование кавитационного изнашивания сталей методом измерения профиля поверхности / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. Т. 81. № 11. С. 62 – 65.
14. Хомская И. В., Разоренов С. В., Гаркушин Г. В. и др. Динамическая прочность субмикроструктурной и нанокристаллической меди, полученной высокоскоростной деформацией / *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. № 4. С. 435 – 442. DOI: 10.31857/S0015323020040063
15. Буравова С. Н., Петров Е. В., Щукин А. С. Особенности перехода откольных трещин в полосы локализованной деформации / *Физика горения и взрыва*. 2016. Т. 52. № 5. С. 131 – 140. DOI: 10.15372/FGV20160512

16. **Игнатова О. Н., Каганова И. И., Мальшев А. Н. и др.** Влияние ударно-волнового нагружения на внутреннюю микроструктуру и механические свойства мелкозернистой меди. / Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. № 6. С. 119 – 124.
17. **Дерibas А. А.** Метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной / Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 5. С. 68 – 74.
18. **Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д.** Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
19. **Добромыслов А. В., Талуц Н. И.** Электронно-микроскопическое исследование деформационной структуры стали 12Х18Н10Т после взрывного нагружения в сферических системах / Диагностика, ресурс и механика материалов и конструкций. 2015. № 5. С. 109 – 117.
DOI: 10.17804/2410-9908.2015.5.109-117

REFERENCES

1. **Sabbaghzadeh B., Parvizi R., Davoodi A., Moyaed M.** Corrosion evaluation of multi-pass welded nickel-aluminum bronze alloy in 3.5% sodium chloride solution: A restorative application of gas tungsten arc welding process / Materials and Design. 2014. N 58. P 346 – 356.
DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.019
2. **Lotfollahi M., Shamanian M., Saatchi A.** Effect of friction stir processing on erosion-corrosion behavior of nickel-aluminum bronze / Materials and Design. 2014. N 62. P 282 – 287.
DOI: 10.1016/j.matdes.2014.05.037
3. **Qin Z., Luo Q., Zhang Q., et al.** Improving corrosion resistance of nickel-aluminum bronzes by surface modification with chromium ion implantation / Surface & Coatings Technology. 2018. N 334. P 402 – 409. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.066
4. **Li Y., Liang Y., Sun Y.** Cavitation erosion behavior of friction stir processed nickel aluminum bronze / Journal of Alloys and Compounds. 2019. N 795. P 233 – 240.
DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.302
5. **Sun Y., Wang H., Liu W., et al.** Improvement of surface resistance to cavitation corrosion of nickel aluminum bronze by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling process / Surface & Coatings Technology. 2019. N 368. P 215 – 223.
DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.03.045
6. **Tsvetkov Yu. N., Gorbachenko E. O.** Features of changing the surface profile of aluminum bronzes during cavitation wear in seawater / Vestn. Gos. Univ. Mor. Rech. Flota im. Adm. S. O. Makarova. 2018. Vol. 10. N 5. P 1004 – 1014 [in Russian].
DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1004-1014
7. **Kuzmin D. A.** The impact of flow-accelerated corrosion on the crack developing in welded joints of NPP equipment and pipelines / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2021. Vol. 87. N 3. P 58 – 63 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-3-58-63
8. **Cottam R., Luzin V., Moody H., et al.** The role of microstructural characteristics in the cavitation erosion behavior of laser melted and laser processed Nickel-Aluminium Bronze / Wear. 2014. N 317. P 56 – 63.
DOI: 10.1016/j.wear.2014.05.002
9. **Qin Z., Li X., Xia D., et al.** Effect of compressive stress on cavitation erosion-corrosion behavior of nickel-aluminum bronze alloy / Ultrasonics Sonochemistry. 2022. N 89. P 106143.
DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106143
10. **Zhang S., Qian Z., Ji B.** Estimation of cavitation erosion area in unsteady cavitating flows using a modified approach / Ocean Engineering. 2022. N 262. P 112229.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112229
11. **Buravova S. N.** Surface damage during cavitation erosion / Zh. Tekhn. Fiz. 1998. Vol. 68. N 9. P 110 – 114 [in Russian].
12. **Taranov D. K., Fedyuk R. S.** Methods of protection against cavitation erosion / Mezhdunar. Nauch.-Issl. Zh. 2021. Vol. 111. N 9. P 54 – 59 [in Russian]. DOI: 10.23670/IRJ.2021.9.111.008
13. **Tsvetkov Yu. N., Gorbachenko E. O.** Estimation of Incubation Period at Cavitation Wear of Steel through Measuring Roughness / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 11. P 62 – 65 [in Russian].
14. **Khomskeya I. V., Razorenov S. V., Garkushin G. V., et al.** Dynamic strength of submicrocrystalline and nanocrystalline copper obtained by high-speed deformation / Fiz. Met. Metalloved. 2020. Vol. 121. N 4. P 435 – 442 [in Russian].
DOI: 10.31857/S0015323020040063
15. **Buravova S. N., Petrov E. V., Shchukin A. S.** Features of the transition of spall cracks into bands of localized deformation / Fiz. Goren. Vzryva. 2016. Vol. 52. N 5. P 131 – 140 [in Russian]. DOI: 10.15372/FGV20160512
16. **Ignatova O. N., Kaganova I. I., Malyshev A. N., et al.** Impact of shock-wave loading on the internal microstructure and mechanical properties of fine-grained copper / Fiz. Goren. Vzryva. 2010. Vol. 46. N 6. P 119 – 124 [in Russian].
17. **Deribas A. A.** Throwing of metal plates by a tangential detonation wave / Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2000. Vol. 41. N 5. P 68 – 74 [in Russian].
18. **Konon Yu. A., Pervukhin L. B., Chudnovsky A. D.** Explosion welding. — Moscow: Mashinostroenie, 1987. — 216 p. [in Russian].
19. **Dobromyslov A. V., Taluts N. I.** An electron-microscopic study of the deformation structure of the 12Kh18N10T steel after explosive loading in spherical systems / Diagn. Resurs Mekh. Mater. Konstr. 2015. N 5. P 109 – 117 [in Russian].
DOI: 10.17804/2410-9908.2015.5.109-117