

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.104>

ОСОБЕННОСТИ ДЕМПФИРОВАНИЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ MN – CU, ЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕМ И ЦИНКОМ

Научная статья

Наумов С.Б.¹, Гиннэ С.В.² *

² ORCID : 0000-0002-2176-7345;

^{1,2} Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (svetlanaginneh[at]rambler.ru)

Аннотация

Сплавы высокого демпфирования на основе Mn – Cu могут эффективно использоваться для снижения вибрации и шума элементов современной высокотехнологичной техники. Исследований о влиянии легирования алюминием и цинком на величину и стабильность демпфирующей способности двойных сплавов Mn – Cu в области амплитудно-независимого демпфирования недостаточно, а их результаты в ряде случаев неоднозначные. Выяснение влияния легирования перечисленных элементов на демпфирование проводили на сплаве Cu + 60% Mn. Изучали демпфирующую способность (логарифмический декремент затухания колебаний) при поперечных колебаниях образцов в диапазоне частот от 1,6 кГц до 2,2 кГц и амплитудах деформации относительного сдвига $(1 - 5) \cdot 10^{-6}\%$. Выявлены два максимума демпфирующей способности в закалённых от 1093 К в воду сплавах Cu + 60% Mn с 0,6% и 4,6% алюминия, 1,0% и 10,0% цинка после старения при температуре 673 К. Получение двух максимумов демпфирующей способности обусловлено очевидно двумя одновременно происходящими процессами в сплавах на основе Mn – Cu: образованием зародышей мартенситной ГЦТ фазы и чистого γ -марганца, который превращается при охлаждении в стабильную фазу α -марганец. Установлено, что легирование 0,6% и 4,6% алюминия, 1,0% и 10,0% цинка не повышает уровень демпфирующей способности двойного сплава Cu + 60% Mn и не способствует сохранению высокого уровня демпфирования при естественном старении в области амплитудно-независимого демпфирования.

Ключевые слова: демпфирование, демпфирующая способность, сплавы на основе Mn – Cu.

FEATURES OF DAMPING OF ALLOYS BASED ON MN – CU DOPED WITH ALUMINIUM AND ZINC

Research article

Naumov S.B.¹, Ginne S.V.² *

² ORCID : 0000-0002-2176-7345;

^{1,2} Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (svetlanaginneh[at]rambler.ru)

Abstract

High damping alloys based on Mn – Cu can be effectively used to reduce vibration and noise of elements of modern high-tech equipment. Studies on the influence of aluminium and zinc alloying on the magnitude and stability of the damping ability of Mn – Cu double alloys in the region of amplitude-independent damping are insufficient, and their results are ambiguous in some cases. The influence of alloying of the listed elements on damping was studied on the alloy Cu + 60% Mn. The damping capacity (logarithmic decrement of vibration damping) was studied at transverse vibrations of samples in the frequency range from 1.6 kHz to 2.2 kHz and relative shear strain amplitudes $(1 - 5) \cdot 10^{-6}\%$. Two maxima of damping capacity in Cu + 60% Mn alloys hardened from 1093 K in water with 0.6% and 4.6% aluminium, 1.0% and 10.0% zinc after ageing at 673 K have been identified. Obtaining of two maximums of damping ability is obviously caused by two simultaneously occurring processes in alloys on the basis of Mn – Cu: formation of nuclei of martensitic HCT phase and pure γ -manganese, which transforms at cooling into stable phase α -manganese. It is established that alloying with 0.6% and 4.6% aluminium, 1.0% and 10.0% zinc does not increase the level of damping ability of double alloy Cu + 60% Mn and does not contribute to preservation of high level of damping at natural ageing in the region of amplitude-independent damping.

Keywords: damping, damping capacity, Mn – Cu based alloys.

Введение

Эксплуатация современных машин, механизмов и технологического оборудования сопровождается постоянным возрастанием динамических и виброакустических нагрузок вследствие увеличения их мощности, энергонагруженности и производительности за счёт высокой скорости движения их рабочих органов [1], [2], [3], [4], [5]. В технике для снижения вибрации и шума применяют сплавы на основе Mn – Cu с высоким внутренним трением или демпфированием. Демпфирующая способность этих сплавов на 1 – 2 порядка выше, чем у сталей, промышленных алюминиевых, медных и титановых сплавов, и в несколько раз больше, чем у чугунов [6], [7], [8], [9], [10]. Однако высокая демпфирующая способность сплавов на основе Mn – Cu не стабильна и уменьшается в несколько раз при естественном старении.

Применение сплавов на основе Mn – Cu в судостроении для изготовления панелей, каркасов, направляющих и виброизоляторов блоков электронных средств, уменьшающих вибрации микроэлектронных устройств

вычислительной техники, может сдерживаться относительно невысокой коррозионной стойкостью этих сплавов в морской среде. Известно, что алюминий и цинк повышают коррозионную стойкость сталей и цветных сплавов. Однако недостаточно исследовано влияния высоких концентраций алюминия и цинка на уровень демпфирующей способности двойных сплавов Mn – Cu. Поэтому **целью** настоящей работы является исследование влияния алюминия и цинка на величину демпфирующей способности двойного сплава Cu + 60% Mn и стабильность его демпфирующей способности при амплитудах деформации относительного сдвига $(1 - 5) \cdot 10^{-6}\%$.

Методы и принципы исследования

С целью выяснения влияния легирования на демпфирующую способность базового сплава Cu + 60% Mn были взяты предельные концентрации алюминия и цинка, которые используются в разработанных легированных сплавах на основе Mn – Cu [11], [12], [13], [14], [15]. В таблице 1 приведён состав исследуемых сплавов на основе Mn – Cu.

Таблица 1 - Состав сплавов на основе Mn – Cu

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.104.1>

Сплав	Химический анализ (% по массе)		
	Mn	Cu	Легирующий элемент
1	58,64	41,46	–
2	59,16	40,24	0,6 Al
3	59,22	36,18	4,6 Al
4	58,62	40,38	1,0 Zn
5	58,34	31,66	10,0 Zn

В качестве шихтового материала использовали электролитический марганец Mn0, катодную медь M0, легирующие элементы в виде медных лигатур. Слитки массой 2 кг отжигали при температуре 1103 К в течение 3 часов и прокатывали в горячем состоянии на полосы толщиной 10 мм, из которых получали цилиндрические образцы размерами $\varnothing 7,7 \times 115$ мм. Образцы нагревали до 1093 К в атмосфере аргона, выдерживали 2 часа и закачивали в воде. Демпфирующую способность (логарифмический декремент затухания колебаний) изучали при поперечных колебаниях образцов на установке «Эластомат» в диапазоне частот от 1,6 кГц до 2,2 кГц и амплитуд деформации относительного сдвига $(1 - 5) \cdot 10^{-6}\%$.

Измерения на установке «Эластомат» проводились следующим образом. Вырабатываемые генератором частоты электромагнитные импульсы усиливались усилителем мощности и поступали в систему передачи. Система передачи вызывала в исследуемом образце механические колебания, которые достигали наибольшей величины в режиме резонанса, то есть при совпадении собственной частоты колебаний образца с частотой импульса генератора. После достижения резонансного режима колебаний образца проводился срыв колебательного процесса. Приемная система преобразовывала механические колебания образца в электромагнитные импульсы, которые после усиления и выпрямления приемным усилителем подавались по величине и фазе к индикаторному узлу. Счетчик индикаторного узла показывал число колебаний испытываемого образца с момента их прерывания до тех пор, пока амплитуда колебаний не снижалась с первоначальной величины A_1 до величины $A_2 = A_1/e$ (e – основание натурального логарифма), представляющую собой величину обратную логарифмическому декременту затухания колебаний δ . Возбуждение и прием колебаний в диапазоне частот от 1,6 кГц до 2,2 кГц осуществляли пьезоголовками с проводами связи.

Относительное рассеяние ψ (затухание) определяли по формуле:

$$\psi = 2\delta \cdot 100\% ,$$

где δ – логарифмический декремент [16].

Ошибка измерения указанным методом составляла 2 – 4% от измеряемой величины.

Основные результаты

На рис. 1 приведены кривые зависимости демпфирующей способности двойного сплава Cu + 60% Mn, закалённого от 1093 К с выдержкой 2 часа, от времени старения при температурах 673 К и 723 К. Из этого рисунка видно, что максимум демпфирующей способности в сплаве Cu + 60% Mn после старения при 673 К получился более размытым, с несколько большим значением демпфирования по сравнению с обработкой при 723 К.

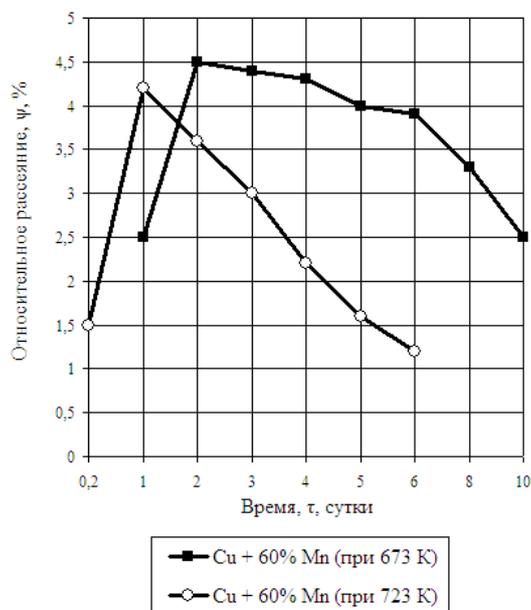


Рисунок 1 - Зависимости демпфирующей способности, ψ , сплава Cu + 60% Mn, закалённого от 1093 К с выдержкой 2 часа, от времени старения, τ , при температурах 673 К и 723 К
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.104.2>

На рис. 2 и 3 представлены данные о кинетике старения сплавов Cu + 60% Mn с 0,6% и 4,6% алюминия, 1,0% и 10,0% цинка, закалённых от 1093 К с выдержкой 2 часа, при температурах 673 К и 723 К.

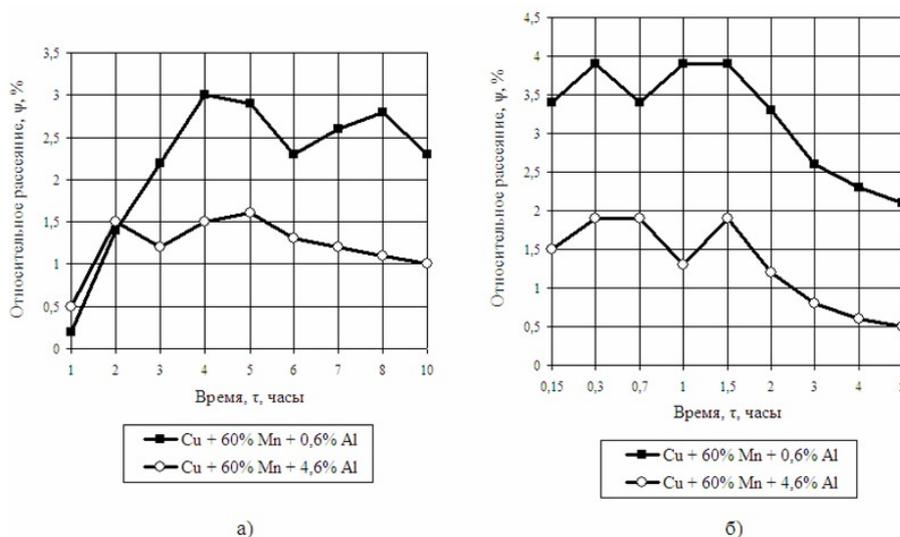


Рисунок 2 - Зависимости демпфирующей способности, ψ , сплавов Cu + 60% Mn с добавками Al, закалённых от 1093 К с выдержкой 2 часа, от времени старения, τ , при температурах 673 К (а) и 723 К (б)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.104.3>

Из рис. 2 видно, что повышение концентрации алюминия в сплаве Cu + 60% Mn с 0,6% до 4,6% приводит к существенному уменьшению его демпфирующей способности. Поскольку известно, что алюминий ускоряет распад ГЦК γ -твёрдого раствора Mn – Cu то, очевидно, что увеличение содержания алюминия в базовом сплаве до 4,6% будет способствовать выделению значительных количеств α -марганца, который, уменьшая количество мартенситной фазы, снижает уровень демпфирующей способности. В сплаве с 4,6% алюминия может образовываться β -фаза [17], [18], которая препятствует расслоению γ -твёрдого раствора Mn – Cu и уменьшает демпфирующую способность сплава.

Кривые изменения демпфирующей способности сплавов Cu + 60% Mn с 0,6% и 4,6% алюминия от времени старения при температурах 673 К и 723 К (рис. 2) показывают два максимума демпфирующей способности. Первые максимумы демпфирования в сплавах Cu + 60% Mn с 0,6% и 4,6% алюминия появляются соответственно в течение 4 часов и 2 часов старения при 673 К. Вторые максимумы демпфирования в этих сплавах создаются старением при 673 К соответственно в течение 8 часов и 5 часов. Старение закалённых сплавов Cu + 60% Mn с 0,6% и 4,6% алюминия при 723 К также характеризуется получением демпфирующей способности.

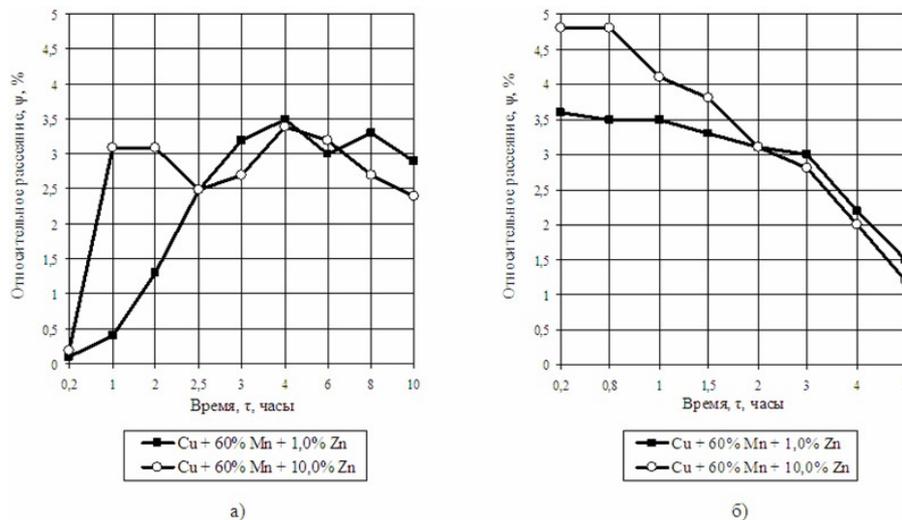


Рисунок 3 - Зависимости демпфирующей способности, ψ , сплавов Cu + 60% Mn с добавками Zn, закалённых от 1093 K с выдержкой 2 часа, от времени старения, τ , при температурах 673 K (а) и 723 K (б)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.104.4>

Старение закалённого сплава Cu + 60% Mn + 1% Zn при температуре 673 K в течение 10 часов (рис. 3а) приводит к получению двух максимумов демпфирующей способности на кривых относительного рассеяния. Первый максимум демпфирования выявляется после 4 часов выдержки при 673 K. Второй максимум демпфирования наблюдается после 8 часов выдержки при 673 K. В сплаве Cu + 60% Mn + 10% Zn максимумы демпфирования появляются после 1 часа и 4 часов выдержки при 673 K.

Добавление в сплав Cu + 60% Mn 10,0% цинка резко сокращает время старения для достижения максимума демпфирующей способности этого сплава (рис. 3). Так, сплаву с 10,0% цинка требуется в четыре раза меньше время старения при температуре 673 K по сравнению со сплавом с 1,0% цинка. Причём старение при температуре 723 K приводит к более резкому уменьшению демпфирующей способности в сплавах с цинком, чем в сплавах с алюминием. Кроме того, старение при температуре 723 K позволяет получить в сплавах с цинком более высокий уровень демпфирующей способности, чем старение при 673 K. Однако легирование сплава Cu + 60% Mn цинком не способствует значительному повышению демпфирующей способности данного сплава после закалки от 1093 K и старения при 723 K.

На рис. 4 показано изменение демпфирующей способности двойного сплава Cu + 60% Mn от времени естественного старения при 293 K после закалки от 1093 K с выдержкой 2 часа и старения при 723 K в течение 1,5 часов. Из этого рисунка видно, что относительное рассеяние сплава Cu + 60% Mn существенно снижается после 10 суток естественного старения при 293 K.

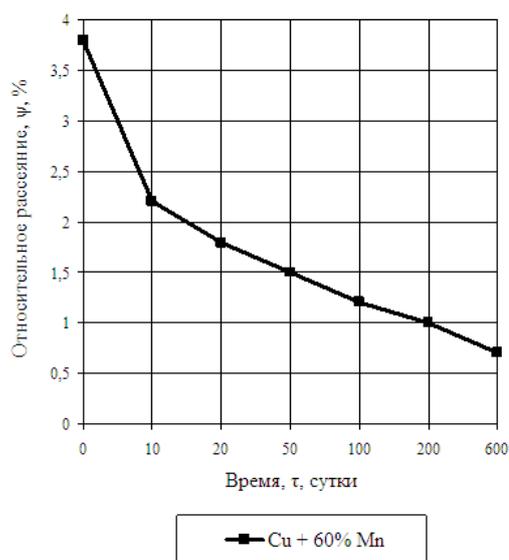


Рисунок 4 - Изменение демпфирующей способности, ψ , сплава Cu + 60% Mn от времени естественного старения, τ , при 293 K после закалки от 1093 K с выдержкой 2 часа и старения при температуре 723 K в течение 1,5 часов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.104.5>

На рис. 5 показано изменение демпфирующей способности сплавов Cu + 60% Mn с 0,6% и 4,6% алюминия, 1,0% и 10,0% цинка, от времени естественного старения при 293 К после закалки от 1093 К с выдержкой 2 часа и старения при 723 К в течение 1,5 часов. Видно, что демпфирующая способность значительно уменьшается в течение 50 суток естественного старения при 293 К. При этом скорости снижения демпфирующей способности сплавов разных составов практически одинаковые.

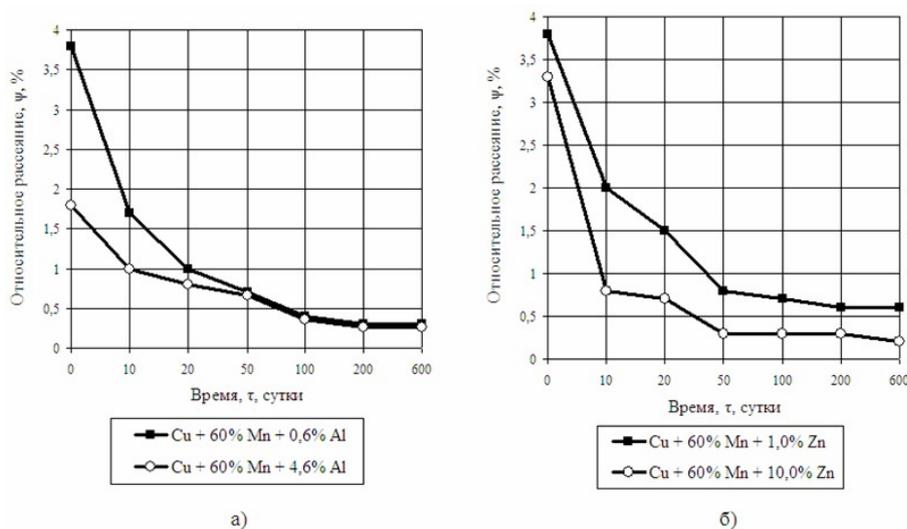


Рисунок 5 - Изменение демпфирующей способности, ψ , сплавов Cu + 60% Mn с добавками Al (а) и Zn (б) от времени естественного старения, τ , при 293 К после закалки от 1093 К с выдержкой 2 часа и старения при температуре 723 К в течение 1,5 часов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.104.6>

Обсуждение

Результаты изучения влияния легирования алюминием, цинком на демпфирующую способность сплава Cu + 60% Mn (рис. 2, 3) показывают, что на кривых изменения демпфирующей способности сплавов с 0,6% и 4,6% алюминия, 1,0% и 10,0% цинка, во времени старения при 673 К выявляются два максимума демпфирования. Ещё Р.Дж. Гудвиним также было обнаружено два максимума демпфирования в сплаве Mn + 36,5% Cu [19]. А Дж.М. Витек и Х. Варлимонт полагают, что снижение демпфирующей способности после получения первого максимума демпфирования связано с дальнедействующими внутренними напряжениями, не устраняемыми двойникованием [20]. Дальнейший рост демпфирующей способности, приводящий ко второму максимуму демпфирования, эти авторы объясняли взаимодействием стенок доменов с когерентными частицами выделений обогащённых медью.

В работах [21], [22] процесс распада закалённого γ -твёрдого раствора сплавов Mn – Cu при старении в интервале температур от 673 К до 723 К характеризуют стадиями, в ходе которых обогащённые марганцем кластеры вначале становятся зародышами мартенситной ГЦТ фазы, а отдельные кластеры в последующем превращаются в α -марганец.

По нашему мнению, получение двух максимумов демпфирующей способности сплавов на основе Mn – Cu во времени старения в интервале температур от 673 К до 723 К вызывается двумя одновременно происходящими процессами: образованием зародышей мартенситной ГЦТ фазы и чистого γ -марганца, который превращается при охлаждении в стабильную фазу α -марганец.

Заключение

Проведённое исследование влияния легирования на демпфирующую способность двойного сплава Cu + 60% Mn показало, что легирование 0,6% и 4,6% алюминия, 1,0% и 10,0% цинка не повышает уровень демпфирующей способности данного сплава и не способствует сохранению высокого демпфирования при естественном старении в области амплитуд деформации относительного сдвига $(1 - 5) \cdot 10^{-6}\%$ – области амплитудно-независимого демпфирования.

Выявлены два максимума демпфирующей способности в закалённых от 1093 К в воду сплавах Cu + 60% Mn с 0,6% и 4,6% алюминия, 1,0% и 10,0% цинка после старения при температуре 673 К. Получение двух максимумов демпфирующей способности вероятно обусловлено двумя одновременно происходящими процессами в сплавах на основе Mn – Cu: образованием зародышей мартенситной ГЦТ фазы и чистого γ -марганца, который превращается при охлаждении в стабильную фазу α -марганец.

Проведённое исследование показало, что высокие концентрации алюминия и цинка мало эффективны для повышения демпфирующей способности сплавов на основе Mn – Cu в области амплитудно-независимого демпфирования. В этой связи дальнейшие исследования по легированию сплавов на основе Mn – Cu алюминием и цинком для повышения их демпфирующей способности могут быть целесообразны в области амплитудно-зависимого демпфирования.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Kiani M. Design of lightweight magnesium car body structure under crash and vibration constraints / M. Kiani, I. Gandikota, M. Rais-Rohani [et al.] // *Journal of Magnesium and Alloys*. — 2014. — № 2(2). — P. 99–108. DOI: 10.1016/j.jma.2014.05.005.
2. Gong D. Analysis on the vertical coupled vibration between bogies and metro car body / D. Gong, W. Jinsong, Z.X. Xie // *Procedia Engineering*. — 2011. — № 16. — P. 825–831. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.1161.
3. Nini H. Experimental research on vibration and noise of rail conveyor / H. Nini, J. Zhang, M. Zhang [et al.] // *Energy Reports*. — 2021. — № 7(7). — P. 494–504. DOI: 10.3390/s23104867.
4. Берестоцкий Э.Г. Шумы и вибрации судовой корпусной и пультовой радиоэлектронной аппаратуры / Э.Г. Берестоцкий, Ю.А. Гладилин, А.М. Яценко // *Судостроение*. — 2020. — № 6. — С. 38–40.
5. Миндрин В.И. Виды и причины вибрации энергетических машин / В.И. Миндрин, Г.В. Пачурин, М.Н. Ребрушкин // *Современные наукоёмкие технологии*. — 2015. — № 5. — С. 32–36.
6. Sun L.Y. Influence of spinodal decomposition on structure and thermoelastic martensitic transition in MnCuAlNi alloy / L.Y. Sun, R.N. Vasin, A.Kh. Islamov [et al.] // *Material Letters*. — 2020. — № 275. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128069.
7. Sun L. Spinodal decomposition influence of austenite on martensitic transition in a Mn-13at% Cu alloy / L. Sun, S.V. Sumnikov, A.Kh. Islamov [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2021. — № 853. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157061.
8. Naumov S.B. Effect of complex alloying of the damping capacity of Mn – Cu alloys in the range of amplitude-independent damping / S.B. Naumov, S.V. Ginne // *Metal Science and Heat Treatment*. — 2024. — № 65(9-10). — P. 663–665. DOI: 10.1007/s11041-024-00986-7.
9. Chen C. Microstructure and damping property of Mn-Cu damping alloy by induction brazing and different heat treating / C. Chen, J. Li, P. Ji [et al.] // *Materials Letters*. — 2023. — № 330. DOI: 10.1177/16878140211013616.
10. Zhu R. Dynamic characteristics of Mn-Cu high damping alloy subjected to impact load / R. Zhu, B. Mao, Q. Zhao [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. — 2021. — № 13(4). — P. 1–20. DOI: 10.1177/16878140211013616.
11. Yan J.Z. Effect pre-deformation and subsequent aging on the damping capacity of Mn – 20at% Cu – 5at% Ni – 2at% Fe alloy / J.Z. Yan, N. Li, X. Fu [et al.] // *Adv. Eng. Mater.* — 2015. — № 17. — P. 1332–1337.
12. Liu W. Novel cast-aged MnCuNiFeZnAl alloy with good damping capacity and high usage temperature toward engineering application / W. Liu, N. Li, Z. Zhong [et al.] // *Materials and Design*. — 2016. — № 106. — P. 45–50.
13. Zhong Z.Y. Mn segregation dependence of damping capacity of as-cast M2052 alloy / Z.Y. Zhong, W.B. Liu [et al.] // *Mater. Sci. Eng.* — 2016. — P. 97–101. DOI: 10.1016/j.msea.2016.02.084.
14. Hou S. Strain glass transition in high damping Mn-22Cu-5Ni-2Fe alloy / S. Hou, F. Qin, J. Han [et al.] // *Progress in Natural Science: Materials International*. — 2018. — № 28(5). — P. 614–617.
15. Zhang S. A comparative study on microstructure and damping capacity of Mn-Cu based alloys with dendrite and equiaxial grain / S. Zhang, X. Guo, Y. Tang [et al.] // *Vacuum*. — 2019. — № 168. — P. 108814.
16. Naumov S. Features of the damping capacity of Mn – Cu alloys / S. Naumov, S. Ginne // *MATEC Web of Conferences*. — 2021. — № 344. DOI: 10.1051/mateconf/202134401012.
17. Гасик М.И. Марганец / М.И. Гасик. — М. : Металлургия, 1993. — 608 с.
18. Koster W. Dreistoffsystem Kupfer-Mangan-Aluminium / W. Koster, G. Tilo // *Ztschr. Metallkunde*. — 1966. — № 57(12). — S. 889–901.
19. Goodwin R.J. Manganese-copper alloys of high damping capacity / R.J. Goodwin // *Met. Sci. J.* — 1968. — № 2(7). — P. 121–129.
20. Vitek J.M. On a metastable miscibility gap in γ -Mn-Cu alloys and the origin of their high damping capacity / J.M. Vitek, H. Warlimont // *Met. Sci. J.* — 1976. — № 7(1). — P. 7–13.
21. Фавстов Ю.К. Металловедение высокодемпфирующих сплавов / Ю.К. Фавстов, А.Г. Рахштадт, Ю.Н. Шульга. — М. : Металлургия, 1980. — 271 с.
22. Gowlam N. Changes in cell dimensions at the martensitic transformation in γ -Mn-Cu alloys / N. Gowlam, G.E. Bacon, L. Gillott // *J. Phys. F. : Met. Phys.* — 1977. — № 7(12). — P. 315–317.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kiani M. Design of lightweight magnesium car body structure under crash and vibration constraints / M. Kiani, I. Gandikota, M. Rais-Rohani [et al.] // *Journal of Magnesium and Alloys*. — 2014. — № 2(2). — P. 99–108. DOI: 10.1016/j.jma.2014.05.005.
2. Gong D. Analysis on the vertical coupled vibration between bogies and metro car body / D. Gong, W. Jinsong, Z.X. Xie // *Procedia Engineering*. — 2011. — № 16. — P. 825–831. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.1161.
3. Nini H. Experimental research on vibration and noise of rail conveyor / H. Nini, J. Zhang, M. Zhang [et al.] // *Energy Reports*. — 2021. — № 7(7). — P. 494–504. DOI: 10.3390/s23104867.

4. Berestotskij E.G. Shumy i vibratsii sudovoj korpusnoj i pul'tovoj radioelektronnoj apparatury [Noises and vibrations of ship hull and console electronic equipment] / E.G. Berestotskij, Ju.A. Gladilin, A.M. Jaschenko // Shipbuilding. — 2020. — № 6. — P. 38–40. [in Russian]
5. Mindrin V.I. Vidy i prichiny vibratsii energeticheskikh mashin [Types and causes of vibration of power machines] / V.I. Mindrin, G.V. Pachurin, M.N. Rebrushkin // Modern High Technologies. — 2015. — № 5. — P. 32–36. [in Russian]
6. Sun L.Y. Influence of spinodal decomposition on structure and thermoelastic martensitic transition in MnCuAlNi alloy / L.Y. Sun, R.N. Vasin, A.Kh. Islamov [et al.] // Material Letters. — 2020. — № 275. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128069.
7. Sun L. Spinodal decomposition influence of austenite on martensitic transition in a Mn-13at% Cu alloy / L. Sun, S.V. Sumnikov, A.Kh. Islamov [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2021. — № 853. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157061.
8. Naumov S.B. Effect of complex alloying of the damping capacity of Mn – Cu alloys in the range of amplitude-independent damping / S.B. Naumov, S.V. Ginne // Metal Science and Heat Treatment. — 2024. — № 65(9-10). — P. 663–665. DOI: 10.1007/s11041-024-00986-7.
9. Chen C. Microstructure and damping property of Mn-Cu damping alloy by induction brazing and different heat treating / C. Chen, J. Li, P. Ji [et al.] // Materials Letters. — 2023. — № 330. DOI: 10.1177/16878140211013616.
10. Zhu R. Dynamic characteristics of Mn-Cu high damping alloy subjected to impact load / R. Zhu, B. Mao, Q. Zhao [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. — 2021. — № 13(4). — P. 1–20. DOI: 10.1177/16878140211013616.
11. Yan J.Z. Effect pre-deformation and subsequent aging on the damping capacity of Mn – 20at% Cu – 5at% Ni – 2at% Fe alloy / J.Z. Yan, N. Li, X. Fu [et al.] // Adv. Eng. Mater. — 2015. — № 17. — P. 1332–1337.
12. Liu W. Novel cast-aged MnCuNiFeZnAl alloy with good damping capacity and high usage temperature toward engineering application / W. Liu, N. Li, Z. Zhong [et al.] // Materials and Design. — 2016. — № 106. — P. 45–50.
13. Zhong Z.Y. Mn segregation dependence of damping capacity of as-cast M2052 alloy / Z.Y. Zhong, W.B. Liu [et al.] // Mater. Sci. Eng. — 2016. — P. 97–101. DOI: 10.1016/j.msea.2016.02.084.
14. Hou S. Strain glass transition in high damping Mn-22Cu-5Ni-2Fe alloy / S. Hou, F. Qin, J. Han [et al.] // Progress in Natural Science: Materials International. — 2018. — № 28(5). — P. 614–617.
15. Zhang S. A comparative study on microstructure and damping capacity of Mn-Cu based alloys with dendrite and equiaxial grain / S. Zhang, X. Guo, Y. Tang [et al.] // Vacuum. — 2019. — № 168. — P. 108814.
16. Naumov S. Features of the damping capacity of Mn – Cu alloys / S. Naumov, S. Ginne // MATEC Web of Conferences. — 2021. — № 344. DOI: 10.1051/mateconf/202134401012.
17. Gasik M.I. Marganets [Manganese] / M.I. Gasik. — M. : Metallurgija, 1993. — 608 p. [in Russian]
18. Koster W. Dreistoffsystem Kupfer-Mangan-Aluminium [Three-material system copper-manganese-aluminium] / W. Koster, G. Tilo // Ztschr. Metallkunde [Journal of Metallurgy]. — 1966. — № 57(12). — P. 889–901. [in German]
19. Goodwin R.J. Manganese-copper alloys of high damping capacity / R.J. Goodwin // Met. Sci. J. — 1968. — № 2(7). — P. 121–129.
20. Vitek J.M. On a metastable miscibility gap in γ -Mn-Cu alloys and the origin of their high damping capacity / J.M. Vitek, H. Warlimont // Met. Sci. J. — 1976. — № 7(1). — P. 7–13.
21. Favstov Ju.K. Metallovedenie vysokodempfirujuschih splavov [Metal science of high-damping alloys] / Ju.K. Favstov, A.G. Rahshtadt, Ju.N. Shul'ga. — M. : Metallurgija, 1980. — 271 p. [in Russian]
22. Gowlam N. Changes in cell dimensions at the martensitic transformation in γ -Mn-Cu alloys / N. Gowlam, G.E. Bacon, L. Gillott // J. Phys. F. : Met. Phys. — 1977. — № 7(12). — P. 315–317.