

УДК 669.745 3.018

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-756-762

Для цитирования: Наумов С. Б., Гиннэ С. В. О влиянии циркония на демпфирующую способность сплава Mn – 40 % Cu в области амплитудно-независимого демпфирования // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 4. С. 756–762. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-756-762.

For citation: Naumov S. B., Ginne S. V. [About the influence of zirconium on the damping capacity of Mn – 40 % Cu alloy in the field of amplitude-independent damping]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 4, P. 756–762. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-756-762.

О влиянии циркония на демпфирующую способность сплава Mn – 40 % Cu в области амплитудно-независимого демпфирования

С. Б. Наумов, С. В. Гиннэ *

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31 *E-mail:
svetlanaginneh@rambler.ru

Приведены результаты исследования демпфирующей способности марганцевомедных сплавов на основе сплава Mn – 40 % Cu с добавками (0,5–1,5) % циркония в области амплитудно-независимого демпфирования. Сплавы на основе Mn – Cu, обладающие высокой демпфирующей способностью, могут эффективно использоваться для уменьшения вибрации и шума. Исследований о влиянии ряда легирующих элементов на величину и стабильность демпфирующей способности двойных сплавов Mn – Cu в области малых деформаций относительного сдвига недостаточно. В настоящей работе было осуществлено выяснение влияния одного из таких элементов – циркония. Марганцевомедные сплавы выплавляли в индукционной печи. Из слитков, отлитых в чугунные изложницы, механической обработкой резанием получали образцы для исследований размерами $(11 \times 15 \times 117) \pm 1$ мм. Образцы подвергали старению при температуре 643 К в течение 0,5–40 ч. Изучали демпфирующую способность (логарифмический декремент затухания колебаний) при продольных колебаниях образцов в диапазоне частот 14–17 кГц и амплитудах относительного сдвига $(1 \dots 3) \cdot 10^{-6}$. Установлено, что легирование сплава Mn – 40 % Cu цирконием от 0,5 до 1,5 % не повышает его демпфирующую способность в литом состоянии, а также в литом и состаренном при температуре 643 К в течение 40 часов состоянии. Выявлено, что минимальные значения частот резонансных колебаний образцов марганцевомедных сплавов предшествуют максимальным уровням демпфирующей способности этих сплавов. Показано, что высокая демпфирующая способность литых и состаренных при 643 К в течение 40 ч сплавов Mn – 40 % Cu, Mn – 38,5–39,5 % Cu – 0,5–1,5 % Zr после естественного старения при 293 К в течение 7 месяцев снижается в 2,0–2,6 раза.

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

About the influence of zirconium on the damping capacity of Mn – 40 % Cu alloy in the field of amplitude-independent damping

S. B. Naumov, S. V. Ginne *

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: svetlanaginneh@rambler.ru

The results of a study of the damping capacity of manganese-copper alloys based on the Mn – 40 % Cu alloy with additives (0,5 ... 1,5) % zirconium in the field of amplitude-independent damping are presented. Mn – Cu alloys with high damping capacity can be effectively used to reduce vibration and noise. Studies on the influence of a number of alloying elements on the magnitude and stability of the damping capacity of Mn – Cu double alloys in the field of small deformations of relative shear are not enough. In the article, the influence of one of these elements, zirconium, was elucidated. Mn – Cu alloys were smelted in an induction furnace. From the ingots cast into cast iron molds, samples for studies with dimensions $(11 \times 15 \times 117) \pm 1$ mm were obtained by mechanical cutting. The samples were subjected to aging at a temperature of 643 K for (0,5 ... 40) hours. The damping capacity of Mn – Cu alloys (the logarithmic decrement of attenuation of oscillations) was studied for longitudinal oscillations of samples in the frequency range (14 ... 17) kHz and the amplitudes of the relative shift $(1 ... 3) \times 10^{-6}$. It has been established that alloying the Mn – 40 % Cu alloy with zirconium from 0,5 % to 1,5 % does not increase its damping capacity in the cast state, as well as in the cast and aged at a temperature of 643 K for 40 hours. It was found that the minimum values of the frequencies of resonant vibrations of samples of Mn – Cu alloys correspond to the maximum levels of the damping capacity of these alloys. It's shown that the high damping capacity of cast and aged alloys at 643 K for 40 hours Mn – 40 % Cu, Mn – (38,5 ... 39,5) % Cu – (0,5 ... 1,5) % Zr after natural aging at 293 K for 7 months decreases by (2,0 ... 2,6) times.

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

Введение

Современная промышленность производит и использует механизмы и машины, характеризующиеся высокими скоростями перемещения. При этом возникают вибрации и шумы, которые понижают надёжность работы оборудования и конструкций, ухудшают условия труда [1–3]. В работе [4] рассматриваются причины возникновения вибраций в электронасосном агрегате космического аппарата и предлагается одним из способов её снижения использование материалов высокого демпфирования. На ракетно-космическом заводе ФГУП «ГКНПц им. М. В. Хруничева» в нескольких цехах отмечается превышение ПДУ по уровням шума на 12–33 дБА и вибрации на 4–8 дБА, что создаётся работой стационарного прессового, кузнечного, клепально-го, сверлильно-фрезерного станочного оборудования и ручными пневмодрелями, пневмоскобками, пневмошлифовальными машинками [5].

Для защиты от шумов и вибраций широкое применение находят сплавы высокого демпфирования. Сплавы высокого демпфирования на основе Mn – Cu эффективно рассеивают вибрации и шумы при малых (порядка 10^{-8} – 10^{-6} относительной деформации) и значительных (порядка 10^{-4} – 10^{-3} относительной деформации) амплитудах деформации, имеют хорошие механические свойства и удовлетворительную технологичность. Полагают, что демпфирующая способность сплавов на основе Mn – Cu при малых амплитудах деформации (области амплитудонезависимого демпфирования) обусловлена внутренними напряжениями, вызванными дефектами кристаллического строения, а при значительных амплитудах деформации движением двойников мартенситной гранецентрированной тетрагональной (ГЦТ) фазы, полученной в результате мартенситного ГЦК – ГЦТ превращения [6; 7]. Однако высокая демпфирующая способность сплавов на основе Mn – Cu, полученная оптимальной термообработкой, существенно уменьшается после естественного старения при температуре 293 К при малых и значительных амплитудах деформаций относительного сдвига [7–10].

Эффективным способом, улучшающим физико-механические свойства сплавов, является их легирование [11; 12]. В этой связи целью настоящей работы является исследование влияния 0,5–1,5 % циркония на демпфирующую способность двойного сплава Mn – 40 % Cu в литом состоянии, после литья и старения при температуре 643 К в течение 40 ч, естественного старения при 293 К в течение 7 месяцев.

Методика эксперимента

С целью выяснения влияния легирования цирконием на демпфирующую способность базового сплава Mn – 40 % Cu были взяты его концентрации от 0,5 до 1,5 %. В таблице приведён состав исследуемых сплавов на основе сплава Mn – 40 % Cu.

Состав сплавов на основе Mn – Cu

Сплав	Химический состав по шихте (% по массе)		
	Mn	Cu	Zr
1	60	40	–
2	60	39,5	0,5
3	60	39,3	0,7
4	60	39,0	1,0
5	60	38,8	1,2
6	60	38,5	1,5

В качестве шихтового материала использовали электролитический марганец Мр0 и Мр1, катодную медь М0, цирконий в медной лигатуре Cu – 30 % Zr. Марганцевомедные сплавы выплавляли в индукционной печи под слоем криолита. Разливку расплава проводили с температур 1673–1723 К сверху в плоские чугунные изложницы, подогретые до температур 423–473 К и смазанные канифолью. Слитки массой 5 кг фрезеровали и разрезали на образцы размерами $(11 \times 15 \times 117) \pm 1$ мм. Образцы подвергали старению в муфельной печи при температуре 643 К в течение 0,5–40 ч.

Демпфирующую способность (логарифмический декремент затухания колебаний) изучали при продольных колебаниях образцов на установке «Эластомат» в диапазоне частот 14–17 кГц и амплитуд относительного сдвига $1-3 \cdot 10^{-6}$. Относительное рассеяние ψ (затухание) определяли по формуле (1):

$$\psi = 2\delta \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где δ – логарифмический декремент.

Ошибка измерения указанным методом составляла 2–4 %.

На рис. 1 представлены зависимости демпфирующей способности двойного сплава Mn – 40 % Cu и сплавов на его основе, легированных 0,5–1,5 % циркония после литья в чугунные изложницы, старения при температуре 643 К в течение 0,5–40 ч и охлаждения на воздухе. Видно, что двойной сплав Mn – 40 % Cu в литом состоянии имеет больший уровень демпфирующей способности ($\psi = 3,2$ %), чем сплавы, содержащие цирконий ($\psi = 2,2-2,7$ %).

Старение исследуемых сплавов при 643 К в течение 0,5–1,0 ч повышает их демпфирующую способность до 3–4 %. При этом наибольший уровень демпфирования ($\psi = 4$ %) показывает двойной сплав Mn – 40 % Cu. После старения при 673 К в течение 2–2,5 ч в данном сплаве происходит некоторое снижение демпфирующей способности до $\psi = 3-3,5$ %. При этой же выдержке в легированных цирконием сплавах уровень демпфирования сохраняется таким же, каким был получен после 0,5–1,0 ч выдержки при 643 К. Последующие выдержки при 643 К до 4,5–12 ч снижают уровень демпфирующей способности в сплавах, легированных цирконием.

Дальнейшее старение при 643 К свыше 12,5 ч повышает уровень демпфирующей способности сплава Mn – 40 % Cu до $\psi = 4,7$ % и сплавов с 0,5, 0,8 и 1 % циркония до $\psi = 3,9$ %, $\psi = 4,2$ % и $\psi = 3,8$ % соответственно. Старение при 643 К в течение 40 ч вызывает снижение демпфирующей способности сплава Mn – 40 % Cu, сплавов с 0,5, 0,8 и 1,2 % циркония. В то же время старение сплавов с 1 и 1,5 % циркония при 643 К в течение 12,5–40 ч не приводит к снижению ранее достигнутого уровня демпфирующей способности ($\psi = 3,7$ %).

На рис. 2 представлены изменения частот резонансных колебаний литых сплавов Mn – 40 % Cu, Mn – 38,5–39,5 % Cu – 0,5–1,5 % Zr. Из рис. 2 видно, что старение сплавов на основе Mn – 40 % Cu при 643 К в течение 0,5–40 ч приводит сначала к некоторому снижению резонансных

частот колебаний, а затем к их повышению. При этом минимальные значения частот резонансных колебаний у всех сплавов на основе Mn – Cu наблюдаются после 16 ч старения при 643 К.

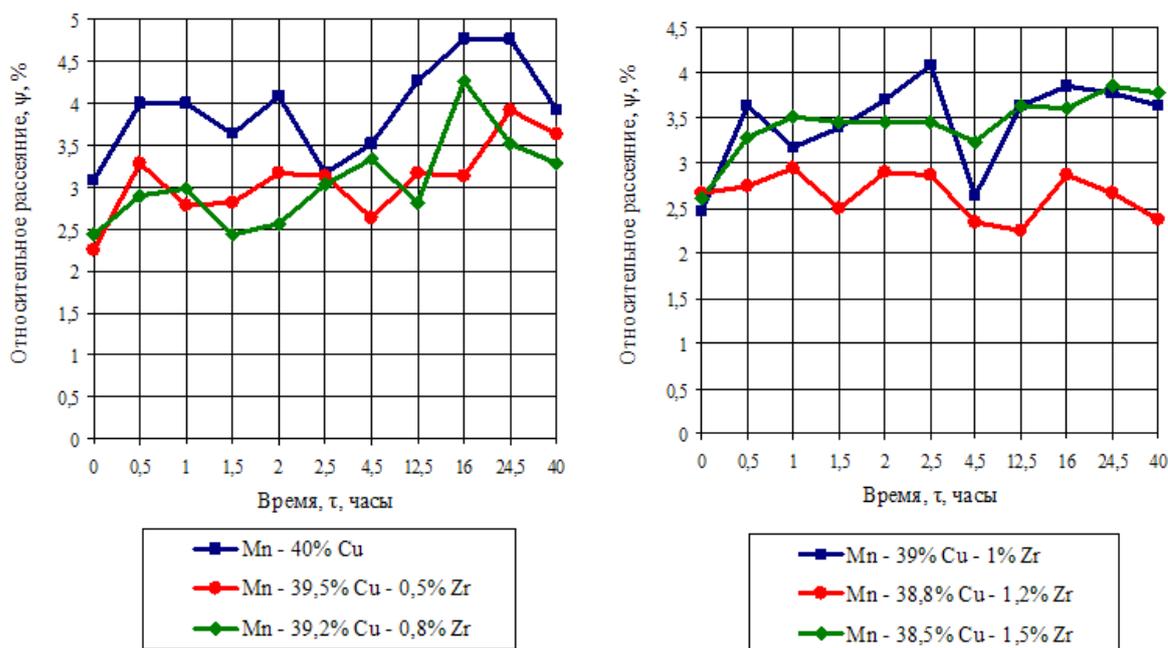


Рис. 1. Зависимости демпфирующей способности, ψ , литых сплавов Mn – Cu от времени старения, τ , при температуре 643 К

Fig. 1. Dependences of the damping capacity, ψ , of the cast Mn – Cu alloys on the aging time, τ , at a temperature of 643 K

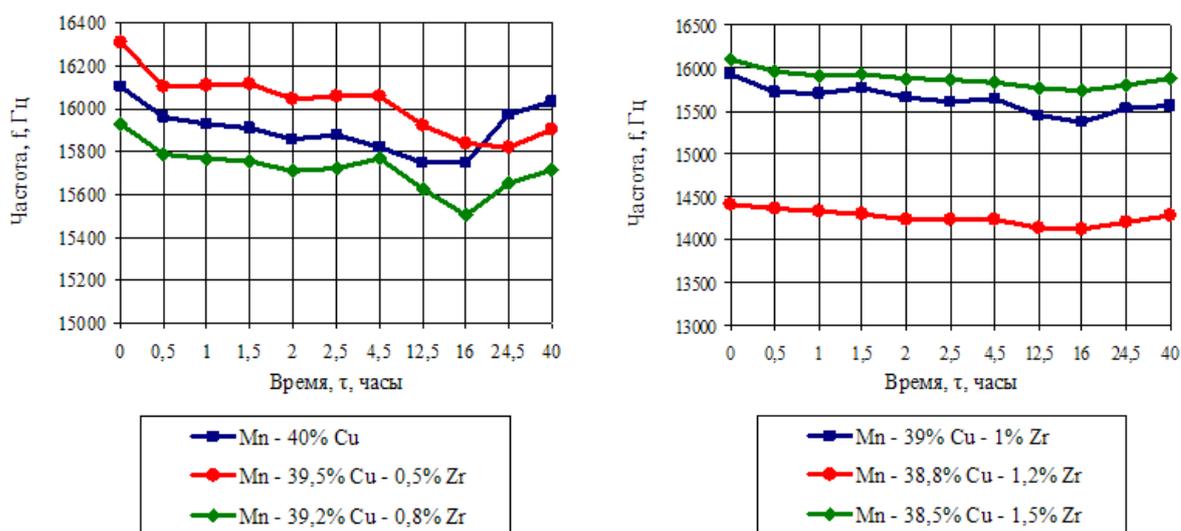


Рис. 2. Изменение частоты резонансных колебаний, f , литых сплавов Mn – Cu от времени старения, τ , при температуре 643 К

Fig. 2. Change of the frequency of resonant oscillations, f , of the cast Mn – Cu alloys on the aging time, τ , at a temperature of 643 K

На рис. 3 представлены зависимости изменения демпфирующей способности исследуемых сплавов на основе сплава Mn – 40 % Cu при естественном старении на протяжении 7 месяцев. Рис. 3 показывает, что демпфирующая способность литых и состаренных при 643 К в течение 40 ч сплавов снижается при естественном старении на протяжении 7 месяцев в 2–2,6 раза.

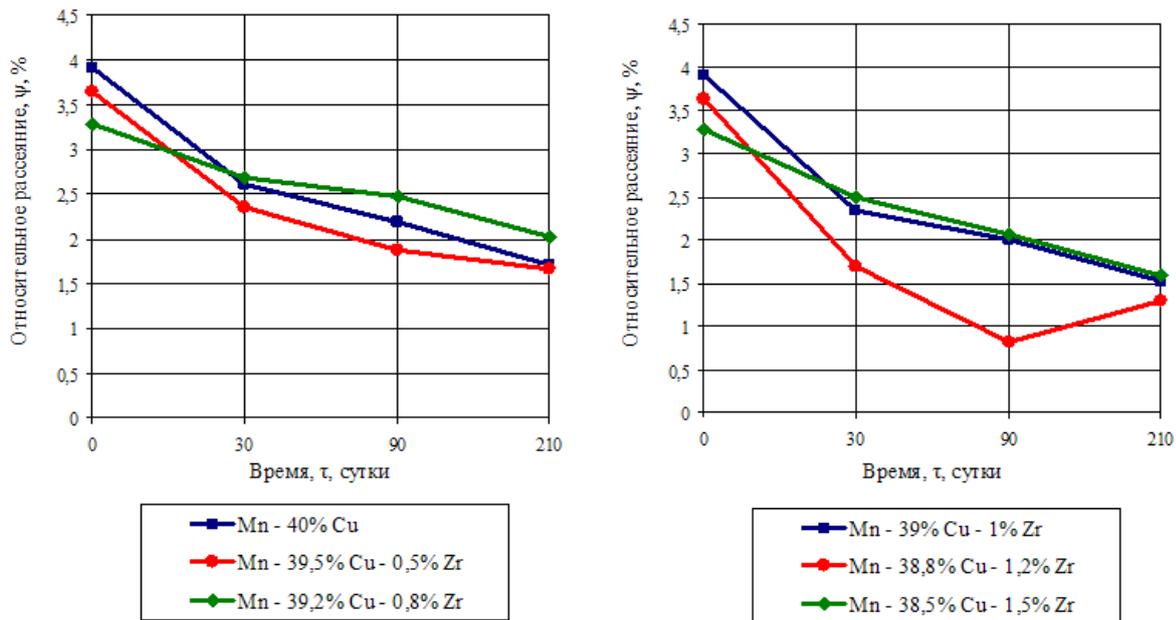


Рис. 3. Изменение демпфирующей способности, ψ , сплавов Mn – Cu, литых и состаренных при 643 К в течение 40 ч, при естественном старении, τ

Fig. 3. Change of the damping capacity, ψ , of the Mn – Cu alloys, which were cast and aged at 643 K within 40 hours, at natural aging, τ

Результаты исследований

Проведённое исследование выявило, что сплавы Mn – 40 % Cu, Mn – 38,5–39,5 % Cu – 0,5–1,5 % Zr, отлитые в чугунные изложницы и затем состаренные при температуре 643 К в течение 0,5–40 ч, показывают разные величины демпфирующей способности. Большой уровень демпфирующей способности $\psi = 4–4,7$ % получен в литых сплавах, состаренных при температуре 643 К. Демпфирующая способность литых сплавов составила $\psi = 2,2–2,7$ %. Наблюдается тенденция в уровне демпфирующей способности марганцевомедных сплавов, которая, очевидно, связана с тем, что при охлаждении этих сплавов в чугунных изложницах задерживается расщепление γ -твёрдого раствора Mn – Cu на области, обогащённые и обеднённые марганцем, что в дальнейшем приводит к образованию мартенситной ГЦТ фазы, ответственной за высокое демпфирование в сплавах на основе Mn – Cu [6; 7]. Старение литых сплавов на основе сплава Mn – 40 % Cu при 643 К приводит к большей степени расщепления γ -твёрдого раствора Mn – Cu и соответственно в итоге к большему уровню демпфирующей способности.

Зависимости изменения демпфирующей способности литых сплавов Mn – 40 % Cu, Mn – 38,5–39,5 % Cu – 0,5–1,5 % Zr от времени старения при температуре 643 К (рис. 1) показывают прерывистое (не монотонное) повышение уровня демпфирующей способности. Некоторое снижение демпфирующей способности после 0,5 ч, нескольких часов старения при 643 К не связано с «перестариванием», а, видимо, является следствием неоднородности исследуемых образцов, что характерно для литого состояния сплавов на основе Mn – Cu [7].

Известно, что частота колебаний связана с модулем нормальной упругости, минимум которого в сплавах на основе Mn – Cu предшествует максимуму их демпфирующей способности [7; 8]. Зависимости изменения частоты резонансных колебаний от времени старения при 643 К исследуемых сплавов на основе сплава Mn – 40 % Cu (рис. 2) показывают минимумы, которые предшествуют максимальным уровням демпфирующей способности этих сплавов.

Зависимости изменения демпфирующей способности литых и состаренных при температуре 643 К сплавов Mn – 40 % Cu, Mn – 38,5–39,5 % Cu – 0,5–1,5 % Zr (рис. 3) показывают, что легирование цирконием не способствует существенной стабилизации уровня демпфирующей способности двойного сплава Mn – 40 % Cu.

Заключение

Проведённое исследование влияния легирования цирконием на демпфирующую способность сплава Mn – 40 % Cu показало, что 0,5–1,5 % циркония не повышает уровень демпфирующей способности данного сплава в литом состоянии, а также в литом и состаренном при температуре 643 К в течение 40 ч состоянии и не способствует существенному сохранению высокого демпфирования при естественном старении в области малых амплитуд деформаций 10^{-6} – 10^{-5} относительного сдвига – области амплитудно-независимого деформирования. Высокая демпфирующая способность литых и состаренных при 643 К в течение 40 ч сплавов Mn – 40 % Cu, Mn – 38,5–39,5 % Cu – 0,5–1,5 % Zr после естественного старения при 293 К в течение 7 месяцев снижается в 2,0–2,6 раза.

Библиографические ссылки

1. Сергиенко В. П., Бухаров С. Н. Вибрация и шум в нестационарных процессах трения : монография. Минск : Белорусская наука, 2012. 347 с.
2. Миндрин В. И., Пачурин Г. В., Ребрушкин М. Н. Виды и причины вибрации энергетических машин // *Современные наукоёмкие технологии*. 2015. № 5. С. 32–36.
3. Пирогов Д. А., Шляпугин Р. В., Эльнашар Е. А. Исследование вибрации и шума ремизной рамы металлостанка // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 11-1. С. 114–118.
4. Причины возникновения вибрации в агрегате электронасосном космического аппарата и способы её снижения / З. А. Юдина, М. И. Синиченко, А. П. Ладыгин и др. // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5, № 2. С. 63–76. Doi: 10.26733/j.st/2021.2.01.
5. Оценка влияния шума и вибрации на состояние здоровья работающих на ФГУП «ГКНПц им. М.В. Хруничева» / Т. С. Ворожейкина, В. Н. Голдобин, С. П. Губарева и др. // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2015. № 3 (53). С. 87–90.
6. Vitek J., Warlimont H. On a metastable miscibility gap in Mn – Cu alloys and the origin of high damping capacity // *Met. Sci. and Eng.* 1976. Vol. 4. P. 7–13.
7. Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н., Рахштадт А. Г. *Металловедение высокодемпфирующих сплавов*. М. : Металлургия, 1980. 272 с.
8. Удовенко В. А., Маркова Г. В., Ростовцев Р. Н. *Сплавы системы Mn – Cu. Структура и свойства : монография*. Тула : Гриф и К, 2005. 152 с.
9. Наумов С. Б., Немировский В. В., Розенберг В. М. Стабильность демпфирования марганцевомедных сплавов // *Цветные металлы*. 1984. № 10. С. 66–67.
10. Naumov S., Ginne S. Features of the damping capacity of Mn – Cu alloys // *MATEC Web of Conferences* 344, 01012 (2021). MPM 2021. Doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202134401012>.
11. Effect of the precipitated second phase during aging on the damping capacity degradation behavior of M2052 alloy / Y. Zhang, N. Li, X. Fu et al. // *Adv. Mater. Res.* 2014. No. 873. P. 36–41.
12. 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. No. 106. P. 45–50.

References

1. Sergienko V. P., Buharov S. N. *Vibraciya i shum v nestacionarnyh processah treniya* [Vibration and noise in non-stationary friction processes]. Minsk, Belorusskaja nauka, 2012, 347 p.
2. Mindrin V. I., Pachurin G. V., Rebrushkin M. N. [Types and causes of vibration of power machines]. *Sovremennye naukoymkie tehnologii*. 2015, No 5, P. 32–36 (In Russ.).
3. Pirogov D. A., Shljapugin R. V., Jel'nashar E. A. [Investigation of vibration and noise of the heald frame of a metal loom]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2017, No 11-1, P. 114–118 (In Russ.).
4. Judina Z. A., Sinichenko M. I., Ladygin A. P., Sin'kovskij F. K., Usmanov D. B. [Causes of vibration in the electric pump unit of the spacecraft and ways to reduce it]. *Kosmicheskie apparaty i tehnologii*. 2021, Vol. 5. No 2, P. 63–76 (In Russ.). Doi: 10.26733/j.st/2021.2.01.

5. Vorozhejkina T. S., Goldobin V. N., Gubareva S. P., Zaozjorskaja S. L., Malyshev S. V., Savicheva N. M., Fedoseeva G. N., Filippov A. A., Carjova L. G. [Evaluation of the impact of noise and vibration on the health status of workers at the Federal State Unitary Enterprise «GKNPts im. M.V. Khrunichev»]. *Medicina yekstremal'nyh situacij*. 2015, No 3 (53), P. 87–90 (In Russ.).
6. Vitek J., Warlimont H. On a metastable miscibility gap in Mn – Cu alloys and the origin of high damping capacity. *Met. Sci. and Eng.* 1976, Vol. 4, P. 7–13.
7. Favstov Ju. K., Shul'ga Ju. N., Rahshtadt A. G. *Metallovedenie vysokodempfirujushhih splavov* [Metal science of high-damping alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980, 272 p.
8. Udovenko V. A., Markova G. V., Rostovcev R. N. *Splavy sistemy Mn – Cu. Struktura i svojstva* [Alloys of the Mn – Cu system. Structure and properties]. Tula, Grif i K Publ., 2005, 152 p.
9. Naumov S. B., Nemirovskij V. V., Rozenberg V. M. [Damping stability of manganese-copper alloys]. *Cvetnye metally*. 1984, No 10, P. 66–67 (In Russ.).
10. Naumov S., Ginne S. Features of the damping capacity of Mn – Cu alloys. *MATEC Web of Conferences 344*. 2021, 01012. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134401012>.
11. Zhang Y., Li N., Fu X., Liu W.B., Liu Y., Zhao X.C. Effect of the precipitated second phase during aging on the damping capacity degradation behavior of M2052 alloy. *Adv. Mater. Res.* 2014, No. 873, P. 36–41.
12. Liu W., Li N. Zhong Z., Yan J., Li D., Liu Y., Zhao X., Sci S.. Novel cast-aged MnCuNiFeZnAl alloy with good damping capacity and high usage temperature toward engineering application. *Materials and Design*. 2016, No. 106, P. 45–50.

© Наумов С. Б., Гиннэ С. В., 2022

Наумов Сергей Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии композиционных материалов и древесиноведения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: naumovsb@sibsau.ru.

Гиннэ Светлана Викторовна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии композиционных материалов и древесиноведения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: svetlanaginneh@rambler.ru.

Naumov Sergey Borisovich – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Composite Materials and Wood Science; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: naumovsb@sibsau.ru.

Ginne Svetlana Viktorovna – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Composite Materials and Wood Science; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: svetlanaginneh@rambler.ru.
