

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Н.В. Беликов

aneox@list.ru

SPIN-код: 6876-9521

Д.Д. Сизова

d.sizova@yandex.ru

SPIN-код: 7511-7910

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

При создании ультразвуковых хирургических инструментов используются функционально-градиентные материалы, обеспечивающие передачу и механическое усиление продольных ультразвуковых волн высокой интенсивности. Изменения скорости звука в материале вдоль оси ультразвукового инструмента могут происходить при использовании термической обработки, например отжига и закалки. В работе выполнен обзор литературы по влиянию различных типов термообработки на скорость звука в сплавах, а также анализ влияния изменения скорости звука части ультразвукового инструмента на его коэффициент усиления. В качестве материала для изготовления ультразвукового инструмента был выбран титановый сплав ВТ6.

Ключевые слова

Термообработка, скорость звука, атеросклероз, ультразвук, ангиохирургия, хирургические инструменты, функционально-градиентные материалы, коэффициент усиления

Поступила в редакцию 19.06.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. В России 55 % смертельных исходов приходится на долю сердечно-сосудистых заболеваний. Распространенным заболеванием сердечно-сосудистой системы является атеросклероз.

Для лечения атеросклероза сонных артерий чаще всего применяют эверсионную эндартерэктомию, при которой после удаления бляшки осуществляют тщательную ревизию внутренней поверхности артерии с помощью промыва стенки физиологическим раствором из шприца [1].

Одно из применений ультразвуковых инструментов в сосудистой хирургии — ультразвуковая гидрообработка биологических поверхностей, которая является актуальной при эверсионной эндартерэктомии. Главная задача гидрообработки — качественная очистка артерии от мелких фрагментов бляшки и обрывков интимы, необходимая для предотвращений послеоперационных осложнений, например, ишемического инсульта. Повышения качества обработки возможно путем увеличения коэффициента усиления в ультразвуковых инструментах. Увеличение коэффициента усиления ультразвуковых систем способствует усилению интенсивности ультразвука, а следовательно, повышению эффективности ультразвукового воздействия. Желаемого усиления можно достичь путем использования функционально-градиентных материалов.

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) — это материалы, обладающие непрерывным пространственным изменением механических свойств, в частности скоростью звука [2].

Коэффициент усиления концентраторов с конусной частью определяется отношением площадей входного и выходного сечений. Входной диаметр конуса ограничен эргономичностью использования врачом ультразвукового узла. Получение большого коэффициента усиления при заданном диаметре входного сечения возможно лишь при малом диаметре выходного сечения. В свою очередь, степень уменьшения диаметра выходного сечения концентратора ограничивается прочностью концентратора, прочностью крепления ультразвукового инструмента.

Использование функционально-градиентных материалов для создания ультразвуковых хирургических инструментов позволяет осуществлять механическое усиление продольных ультразвуковых колебаний высокой интенсивности без изменения геометрии инструмента, что важно при разработке ультразвуковых хирургических инструментов для ангиохирургии, где имеется потребность в использовании надежных и малогабаритных систем [2].

Изменение скорости звука в материале вдоль оси ультразвукового инструмента возможно благодаря использованию термической обработки.

Основными способами термической обработки металлов и сплавов являются отжиг, закалка, нормализация, нагрев, отпуск и старение. Отжиг характеризуется продолжительной выдержкой при нагреве до высокой температуры и последующим медленным охлаждением. Закалка заключается в нагреве до температуры выше критической и последующем быстром охлаждении в различных средах, например, в воде или масле. При нормализации сталь нагревают до температур более 1000 °С и после выдержки охлаждают на спокойном воздухе. Отпуск включает в себя нагрев закаленных сталей до температуры, не превышающей 700 °С. Старение заключается в выдержке сплава при нормальной (естественное старение) или повышенной (искусственное старение) температуре [3].

В данной работе выполнен обзор литературы, посвященной влиянию различных типов термообработки на скорость звука в сплавах.

В ходе исследований влияния нагрева и закалки на сталь SAE 4150 [4] обнаружено уменьшение скорости звука на 1...2 %. При изучении влияния термической обработки на скорость звука в сталях 40, 45, У7 и У10 авторы [5] отметили, что скорость звука нормально отожженных образцов после отжига уменьшалась на 0,01...0,20 %, а после закалки — на 0,04...0,50 %.

В экспериментах [6–9] установлено, что скорость звука в сталях У8А и У9А, измеренная резонансным методом, уменьшается после закалки по сравнению с исходным состоянием на 0,2 %. В работах [10–12] оценивали влияние длительности отпуска на скорость распространения звука в осевой вагонной стали ОсВ. Изменения скорости звука регистрировали методом автоциркуляции поверхностных акустических импульсов. Установлено, что при увеличении температуры отпуска до 250 °С скорость звука сначала растет, а затем снижается. Макси-

мальное увеличение скорости звука составило 0,125 %. В работе [13] проводили исследование влияния отжига на скорость звука в сплаве алюминия АД1. После отжига скорость звука увеличилась на 0,9 %. В работе [7] изучены изменения скорости распространения звука в стали 12Х1МФ после нормализации при различной температуре. Измерения выполняли методом автоциркуляции импульсов. Скорость звука увеличилась на 0,2 %.

В работах [14, 15] выявлено влияние закалки на скорость звука в конструкционной стали ШХ15. Максимальное увеличение скорости звука составило 3,5 %. Влияние закалки на скорость звука в алюминиево-литиевом сплаве 1420 изучали в работах [9, 10, 17, 18]. Скорость звука в сплаве 1420 растет при закалке и уменьшении длительности старения на 0,8 %. В работе [15] приведены данные о скорости звука в сплавах 40, 45, 12ХНЗА, 25ХНВА и 30ХГСА до и после закалки и отпуска. Изменение скорости звука в стали 25ХНВА составило 0,3 %, в остальных — 1,3...0,1 %.

Основным материалом для создания ультразвуковых инструментов служат титановые сплавы. Данные об изменении скорости звука в таких сплавах в зависимости от типа термообработки рассмотрены в следующих работах.

М.М. Ляховицкий и соавт. [19] исследовали температурные зависимости акустических характеристик (скорость распространения и затухания звука) титанового сплава ВТ23 после таких режимов термообработки, как закалка, отжиг и старение. В ходе анализа графических зависимостей, представленных в указанных статьях, было определено, что при закалке скорость звука в титановом сплаве ВТ23 увеличивается на 3,5 %, при отжиге — на 10,5 %, а при старении — на 12 %.

В. В. Рощупкин и соавт. [20] рассматривали влияние отжига на скорость звука в титановом сплаве ВТ-20. Скорость звука определяли по известной длине рабочего участка образца и времени прохождения импульса. При комнатной температуре скорость звука отожженного образца возрастала на 4 %, а в диапазоне 500...700 °С эта разница увеличилась до 10...12 %.

Усиление колебаний в инструментах для ультразвуковой гидрообработки. В данной работе выполнен анализ влияния изменения скорости звука части ультразвукового инструмента для ультразвуковой гидрообработки после ручной эндартерэктомии на его коэффициент усиления. В качестве материала инструмента был выбран титановый сплав ВТ6. Вычисления проводили в программной среде MATLAB. Для ультразвукового инструмента задавали основные размеры (рис. 1), выполняли расчет резонансной длины (x на рис. 1) и определяли коэффициент усиления. Частота колебаний ультразвукового инструмента была выбрана равной 25 кГц.

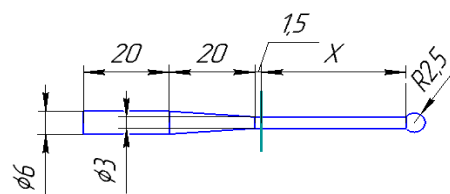


Рис. 1. Основные размеры и резонансная длина ультразвукового инструмента

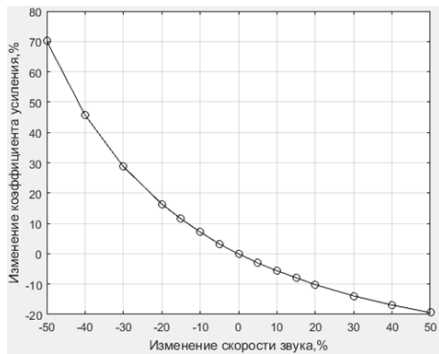


Рис. 2. Зависимость изменения коэффициента усиления ультразвукового инструмента от изменения скорости звука в дистальной части относительно проксимальной

Скорость звука в материале проксимальной части инструмента задавали равной 4950 м/с, а в дистальной части ее изменяли в диапазоне $\pm 50\%$ относительно проксимальной с шагом 5...10%. Плотность материала была постоянной и равной 4420 кг/м³.

По результатам измерений построена зависимость изменения коэффициента усиления ультразвукового инструмента от изменения скорости звука в дистальной части относительно проксимальной (рис. 2).

Полученные результаты показывают, что уменьшение скорости звука в материале дистальной части волновода относительно проксимальной части способствует увеличению коэффициента усиления

ультразвукового инструмента.

Усиление колебаний в ультразвуковых инструментах для эндоваскулярной хирургии. Ультразвуковые хирургические инструменты применяются и в эндоваскулярной хирургии. В этой области важной является проблема усиления интенсивности колебаний. Во многом это связано с наличием у эндоваскулярных инструментов длинной проводниковой части, в которой в результате внутреннего трения происходит диссипация энергии. Немаловажным фактором является также ограничение минимального диаметра рабочего окончания, вызванное необходимостью взаимодействия с большой площадью сосудистой стенки. В связи с этим использование ФГМ для усиления колебаний в ультразвуковых эндоваскулярных инструментах позволяет компенсировать потери на внутреннее трение в проводниковой части инструмента.

В данной работе выполнен расчет, проведены моделирование и сравнение ультразвуковых инструментов для внутрисосудистых операций с проводниковой частью, различная часть длины которой подвергнута термообработке.

Основные размеры исследуемого ультразвукового инструмента показаны на рис. 3.

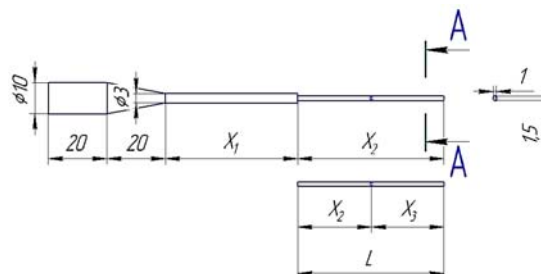


Рис. 3. Основные размеры и резонансная длина ультразвукового инструмента для эндоваскулярной хирургии

В качестве материала использовали титановый сплав ВТ6. Измерения проводили для частоты колебаний ультразвукового инструмента 25 кГц. Резонансную длину волновода-концентратора (x_1 на рис. 3) рассчитывали отдельно. Ориентировочную длину проводниковой части выбирали исходя из необходимости доставки ультразвуковых колебаний от точки ввода (минимально-инвазивного доступа) до места обработки. На проводниковом участке длины необработанной (x_2), термообработанной до уменьшения скорости звука на 5 (x_3) и 10 % (x_3) частей определяли исходя из условия стыка в узле перемещения и окончания в узле напряжения.

Для определения наилучшего соотношения длин необработанной и обработанной частей расчет выполняли с помощью пакета прикладных программ Ansys. В ходе расчета для каждого инструмента определяли амплитудно-частотную характеристику (рис. 4) и коэффициент усиления (рис. 5).

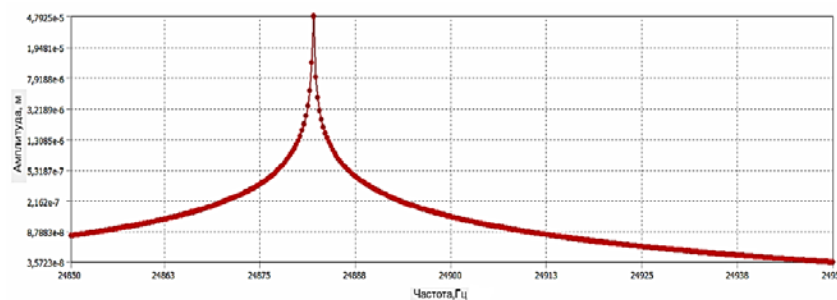


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика ультразвукового инструмента вблизи резонанса

Выводы. Применение термообработки для изменения скорости звука позволит использовать свойства функционально-градиентного материала для механического усиления продольных ультразвуковых колебаний, что повысит эффективность создаваемых ультразвуковых инструментов для ангиохирургии.

С увеличением длины термообработанного участка в проводниковой части растет коэффициент усиления волновода-инструмента. Однако при приближении этой длины к общей длине всего участка возрастает вероятность возникновения напряжений, близких к усталостным напряжениям для материала в стыке волновода-концентратора и проводниковой части.

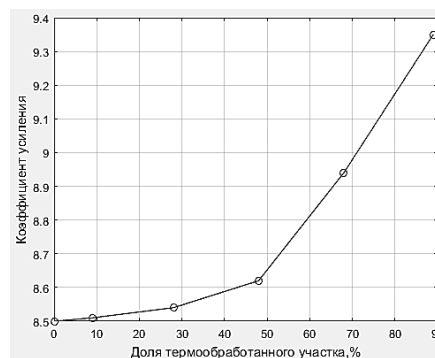


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления ультразвукового инструмента при различной доле термообработанного участка

Литература

- [1] Покровский А.В., Саврасов Г.В., Новиков Ю.В., Красавин В.А., ред. *Ультразвуковая ангиохирургия*. Ярославль, ДиАр, 2004, с. 188–251.
- [2] Степаненко Д.А., Минченя В.Т. Методика расчета и возможные применения функционально-градиентных ультразвуковых волноводов. *Механика машин, механизмов и материалов*, 2013, № 2, с. 19–23.
- [3] Кушнер В.С., Верещака А.С., Схиртладзе А.Г., Негров Д.А., Бургонова О.Ю. *Материаловедение*. Омск, Изд-во ОмГТУ, 2008, 232 с.
- [4] Paradakis E.P. Ultrasonic attenuation and velocity in three transformation products in steel. *J. Appl. Phys.*, 1964, vol. 35, no. 5, pp. 1474–1482.
- [5] Щукин В.А. Скорости распространения ультразвуковых волн в различных металлах и сплавах. *Дефектоскопия*, 1977, № 3, с. 65–68.
- [6] Муравьев В.В., Билута А.П. Разработка ультразвукового метода контроля качества термообработки инструментальной стали У8. *Пути повышения качества и надежности инструмента. Тез. 3-й зон. конф.* Барнаул, Алт. политехи, ин-т. 1989, с. 35–36.
- [7] Муравьев В.В., Билута А.П. *Ультразвуковой контроль термобработанных углеродистых сталей и сварных швов*. Методы и средства повышения информативности и достоверности результатов ультразвуковой дефектоскопии сварных металлоконструкций. Ленинград, ЛИИЖТ, 1989, с. 77–79.
- [8] Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Билута А.П. Ультразвуковой метод контроля структуры металла инструментальной стали У8. *Повышение эффективности технологических процессов машиностроительных производств. Тез. докл. науч.-практ. конф.* Барнаул, ЛПИ, 1989, с. 77–78.
- [9] Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Билута А.П. Взаимосвязь структуры и механических свойств инструментальной углеродистой стали со скоростью распространения ультразвуковых колебаний. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1992, № 2, с. 69–71.
- [10] Муравьев В.В., Кодолов В.П., Бедарев А.С. Неразрушающий контроль структуры и свойств новых алюминиево-литиевых сплавов. *Проблемы ж.-д. транспорта Сибири. Тез. докл. науч.-тех. конф. Ч. 2*. Новосибирск, НИИЖТ, 1992, с. 37–39.
- [11] Муравьев В.В. Неразрушающий метод контроля структурного состояния сталей и сплавов. *Информлисток Томского ЦНТИ*, 1987, № 87-2, с. 1–4.
- [12] Муравьев В.В. *Закономерности изменения скорости распространения ультразвука при термической обработке сталей и алюминиевых сплавов*. Автореф. дисс. док. тех. наук. Томск, 1993, 40 с.
- [13] Семенов Б.Н., Смирнов И.В., Судьбенков Ю.В., Татарина Н.В. Влияние термообработки на механические свойства ультрамелкозернистого алюминия. *Materials Physics and Mechanics*, 2015, т. 24, № 4, с. 319–324.
- [14] Муравьев В.В., Комаров К.Л. Контроль посадки железнодорожных подшипников ультразвуковым методом. *Проблемы ж.-д. транспорта Сибири. Тез. докл. науч.-тех. конф. Ч. 2*. Новосибирск, НИИЖТ, 1992, с. 32–33.
- [15] Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. *Скорость звука и структура сталей и сплавов*. Новосибирск, Наука, 1996, 184 с.
- [16] Муравьев В.В., Серегин Г.В. Влияние наклепа и последующей термообработки на механические свойства и структуру сплавов АК4-1, Д16. *Вопросы повышения надежности и эффективности работы ж.-д. транспорта*. Новосибирск, НИИЖТ, 1982, с. 153.

- [17] Муравьев В.В., Бедарев А.С., Зуев Л.Б. Структура и соотношения в новых Li-Al сплавах. *Актуальные проблемы современного материаловедения. Сб. тез. всеросс. конф.* Томск, 1992, с. 27–29.
- [18] Муравьев В.В., Смирнов А.И., Коваленко А.В. Диагностика структуры и твердости железнодорожных подшипников неразрушающим методом. *Проблемы ж.-д. транспорта Сибири. Тез. докл. науч.-тех. конф. Ч. 2.* Новосибирск, НИИЖТ, 1992, с. 36–37.
- [19] Ляховицкий М.М., Рощупкин В.В., Минина Н.А., Покрасин М.А., Соболев Н.Л. Исследование структурных превращений в титановом сплаве. *Физика и химия обработки материалов*, 2010, № 4, с. 90–94.
- [20] Рощупкин В.В., Семашко Н.А., Лановенко Е.В., Лановенко В.В. Акустические свойства титанового сплава ВТ20 в диапазоне температур 300-1300 К. *ТВТ*, 2001, т. 39, № 4, с. 679–681.

Беликов Никита Владимирович — аспирант, лаборант кафедры «Биомедицинские технические системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Сизова Дарья Дмитриевна — магистрант кафедры «Биомедицинские технические системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Саврасов Геннадий Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Биомедицинские технические системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

THE INFLUENCE OF THE SOUND VELOCITY CHANGE ON THE AMPLIFICATION GAIN OF THE ULTRASOUND INSTRUMENT

N.V. Belikov

aneox@list.ru

SPIN-code: 6876-9521

D.D. Sizova

d.sizova@yandex.ru

SPIN-code: 7511-7910

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

When producing ultrasound surgical instruments functionally gradient materials are used. They provide transmission and mechanical reinforcement of high intensity longitudinal ultrasonic waves. The sound velocity variations in the material along the axis of the ultrasound instrument may occur when using the thermal processing such as annealing and hardening. The work contains literature review regarding the impact of various heat treatment types on the sound velocity in alloys and analyzes the influence of the sound velocity change in ultrasound instrument's part on its amplification gain. We select titanium alloy VT-6 as the material for producing the ultrasound instrument.

Keywords

Thermal processing, sound velocity, atherosclerosis, ultrasound, angiolsurgery, surgical instruments, functionally gradient materials, amplification gain

Received 19.06.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Pokrovskiy A.V., Savrasov G.V., Novikov Yu.V., Krasavin V.A., eds. Ul'trazvukovaya angiokhirurgiya [Ultrasound surgery]. Yaroslavl', DiAr publ., 2004, pp. 188–251.
- [2] Stepanenko D.A., Minchenya V.T. Investigation of longitudinal vibration of flexible ultrasonic waveguides by means of transfermatrix method. Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2013, no. 2, pp. 19–23.
- [3] Kushner V.S., Vereshchaka A.S., Skhirtladze A.G., Negrov D.A., Burgonova O.Yu. Materialovedenie [Material engineering]. Omsk, OmSTU publ., 2008, 232 p.
- [4] Paradakis E.P. Ultrasonic attenuation and velocity in three transformation products in steel. J. Appl. Phys., 1964, vol. 35, no. 5, pp. 1474–1482.
- [5] Shchukin V.A. Velocity of ultrasound waves propagation in different materials and alloys. Defektoskopiya, 1977, no. 3, pp. 65–68.
- [6] Murav'yev V.V., Biluta A.P. Razrabotka ul'trazvukovogo metoda kontrolya kachestva termoobrabotki instrumental'noy stali U8 [Development of ultrasound method for quality of U8 tool steel control]. Puti povysheniya kachestva i nadezhnosti instrumenta. Tez. 3-y zon. konf. [The ways of raising tools quality and reliability. Abs. 3d region. conf.]. Barnaul, Alt. politekhi, in-t. 1989, pp. 35–36.
- [7] Murav'yev V.V., Biluta A.P. Ul'trazvukovoy kontrol' termoobrabotannykh uglerodistykh staley i svarnykh shvov. Metody i sredstva povysheniya informativnosti i dostovernosti rezul'tatov ul'trazvukovoy defektoskopii svarnykh metallokonstruktsiy [Ultrasound control of thermal-treated carbon steels and welded joints. In: Methods and instruments for improving informational content and validity of ultrasound defectoscopy results for welded metal constructions]. Leningrad, LIIZhT publ., 1989, pp. 77–79.

[8] Murav'yev V.V., Zuev L.B., Biluta A.P. Ul'trazvukovoy metod kontrolya struktury metalla instrumental'noy stali U8 [Ultrasound method for structure control of U8 tool steel metal]. Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov mashinostroitel'nykh proizvodstv. Tez. dokl. nauch.-prakt. konf. [Raising efficiency of technological processes in machinery production. Abs. sci.-pract. conf.]. Barnaul, LPI, 1989, pp. 77–78.

[9] Murav'yev V.V., Zuev L.B., Biluta A.P. Relation between structure and mechanical properties of carbon tool steel and ultrasound waves propagation velocity. Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol', 1992, no. 2, pp. 69–71.

[10] Murav'yev B.V., Kodolov V.P., Bedarev A.S. Nerazrushayushchiy kontrol' struktury i svoystv novykh alyuminievo-litievyykh splavov [Non-destructive control of structure and properties of new aluminium-lithium alloys]. Problemy zh.-d. transporta Sibiri. Tez. dokl. nauch.-tekh. konf. Ch. 2 [Problems of Siberia rail transport. Abs. sci.-tech. conf. P. 2]. Novosibirsk, NIIZhT publ., 1992, pp. 37–39.

[11] Murav'yev V.V. Non-destructive method for structural state control of steels and alloys. *Informlistok Tomskogo TsNTI*, 1987, no. 87-2, pp. 1–4.

[12] Murav'yev V.V. Zakonomernosti izmeneniya skorosti rasprostraneniya ul'trazvuka pri termicheskoy obrabotke staley i alyuminievyykh splavov. Avtoref. diss. dok. tekh. nauk [Laws of changes in ultrasound propagation velocity in thermal treatment of steels and aluminium alloys. Abs. doc. tech. sci. diss.]. Tomsk, 1993, 40 p.

[13] Semenov B.N., Smirnov I.V., Sud'yenkov Yu.V., Tatarinova N.V. Effect of heat treatment on the mechanical properties of ultrafine-grained aluminium. *Materials Physics and Mechanics*, 2015, vol. 24, no. 4, pp. 319–324.

[14] Murav'yev V.V., Komarov K.L. Kontrol' posadki zheleznodorozhnykh podshipnikov ul'trazvukovym metodom [Control on rail bearing fit by ultrasound method]. Problemy zh.-d. transporta Sibiri. Tez. dokl. nauch.-tekh. konf. Ch. 2 [Problems of Siberia rail transport. Abs. sci.-tech. conf. P. 2]. Novosibirsk, NIIZhT, 1992, s. 32–33.

[15] Murav'yev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. Skorost' zvuka i struktura staley i splavov [Speed of sound and structure of steels and alloys]. Novosibirsk, Nauka publ., 1996, 184 p.

[16] Murav'yev V.V., Seregin G.V. Vliyanie naklepa i posleduyushchey termoobrabotki na mekhanicheskie svoystva i strukturu splavov AK4-1, D16 [Effect of cold hammering and posterior thermal treatment on mechanical properties and structure of AK4-1, D16 alloys]. Voprosy povysheniya nadezhnosti i effektivnosti raboty zh.-d. transporta [Problems of raising rail transport working reliability and efficiency]. Novosibirsk, NIIZhT publ., 1982, p. 153.

[17] Murav'yev V.V., Bedarev A.S., Zuev L.B. Struktura i sootnosheniya v novykh Li-Al splavakh [Structure and proportions in new Li-Al alloys]. *Aktual'nye problemy sovremennogo materialovedeniya. Sb. tez. vseross. konf.* [Actual problems of material engineering. Abs. Russ. conf.]. Tomsk, 1992, pp. 27–29.

[18] Murav'yev V.V., Smirnov A.Y., Kovalenko A.V. Diagnostika struktury i tverdosti zheleznodorozhnykh podshipnikov nerazrushayushchim metodom [Structure and hardness diagnostics of rail bearings by non-destructive method]. Problemy zh.-d. transporta Sibiri. Tez. dokl. nauch.-tekh. konf. Ch. 2 [Problems of Siberia rail transport. Abs. sci.-tech. conf. P. 2]. Novosibirsk, NIIZhT, 1992, s. 36–37.

[19] Lyakhovitskiy M.M., Roshchupkin V.V., Minina N.A., Pokrasin M.A., Sobol' N.L. An investigation of the structure transformations in titanium alloy. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of materials treatment], 2010, no. 4, pp. 90–94.

[20] Roshchupkin V.V., Semashko N.A., Lanovenko E.V., Lanovenko V.V. Acoustic properties of VT20 titanium alloy in the temperature range from 300 to 1300 K. *TVT*, 2001, vol. 39, no. 4, pp. 679–681. (Eng. version: *High Temperature*, 2001, vol. 39, no. 4, pp. 634–636).

Belikov N.V. — Post-graduate, Departmental Assistant, Department of Biomedical Engineering Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Sizova D.D. — Master's Degree student, Department of Department of Biomedical Engineering Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — G.V. Savrasov, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Department of Biomedical Engineering Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.