

УДК 629.73.002.2

В.Ф. Безъязычный, И.Н. Аверьянов

Рыбинский государственный авиационный технический университет
им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕМПФИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ И ШУМОГЛУШЕНИЯ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Посвящено исследованию проблемы шумоглушения и вибраций в ремонтном производстве авиационных двигателей и наземных газотурбинных установок за счет введения в элементы их конструкций демпфирующих многослойных вязкоупругих покрытий. В процессе работы проводились экспериментальные исследования демпфирующей способности покрытий в зависимости от частоты, амплитуды колебаний, температуры и их влияния на шумоглушение. Результаты исследований показали, что применение демпфирующих покрытий существенно снижает уровень вибраций и шумоглушения (на 30–50 %). В качестве покрытия использовался никель как ферромагнитный материал с аномально большим внутренним трением. Доказано, что при правильном подходе демпфирование может играть важную роль в качестве одного из наиболее удачных способов решения задачи шумоглушения и устранения колебаний при ремонте устаревших конструкций авиационных двигателей и наземных газотурбинных установок по уровням шума и вибраций.

Ключевые слова: шумоглушение, ремонт, технология, конструкция, шум, мощность, демпфирование, покрытия, колебания, испытания.

V.F. Bezyazychny, I.N. Averyanov

P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Rybinsk, Russian Federation

BY THE USE OF DAMPING COATINGS TO REDUCE VIBRATION AND DAMPING IN REPAIR WORK

The article is devoted to the sound-suppressing and vibration problems during the repair of aircraft engines and land-based gas turbines by establishment of layered viscoelastic damping coatings in elements of their designs. In the process of work the experimental researches of damping capacity of coatings depending on the frequency, fluctuation amplitude, temperature and their influence on the noise reduction were carried out. The researches have shown that use of damping coatings significantly reduces vibration and sound-suppressing (30–50 %). As a coating the nickel was used since it is ferromagnetic material with abnormally high internal friction. It was proved that with proper approach the damping can play an important role as one of the best ways to solve the problem of noise reduction and elimination of fluctuations during the repair of old aircraft engines and land-based gas turbines.

Keywords: noise reduction, repair, technology, construction, noise, power, damping, coatings, fluctuations, trials.

В современных условиях хозяйствования предприятия, занятые ремонтом изделий, в том числе авиационных двигателей и наземных газотурбинных установок, должны ориентироваться на потребителей своей продукции, стремясь удовлетворить их возрастающие потребности, достаточно быстро оценивая и внедряя новые методы организации ремонта и восстановления изношенных сборочных единиц и поверхностей деталей с применением ресурсосберегающих технологий для снижения вибраций и шумоглушения [1–4].

Одной из проблем, возникающих при ремонте изделий устаревших конструкций, является соблюдение более новых стандартов по уровням шума и вибраций. Хотя проблемы шума и виброизоляции могут различаться по своей природе и сложности, существует довольно небольшое число способов их решения. Наиболее часто используемыми подходами к решению таких задач являются: воздействие на источник колебаний, изменение конструкции, виброизоляция, установка кожухов и ограждений, но в то же время всякого рода ограждения не являются приемлемым решением поставленной задачи, поскольку они утяжеляют и удорожают конструкцию, порождают проблемы изготовления и обслуживания уже в существующих конструкциях ремонтируемых изделий.

Более современным методом решения данной проблемы является использование вязкоупругих демпфирующих материалов, с помощью которых энергия при колебаниях может поглощаться внутри некоторого малого элемента, введенного в конструкцию при ее циклическом движении.

Для того чтобы снизить уровень шума ремонтируемого авиационного двигателя или наземной газотурбинной установки, следует уменьшить каждую из основных составляющих. Выявление того, какой именно метод демпфирования (звукоизоляция или увеличение жесткости) наиболее подходит к той или иной составляющей, требует анализа влияния отдельных характеристик акустического излучения всего шума для рассматриваемого диапазона частот колебаний. Подход к этой проблеме зависит от динамических свойств конструкции и от того, связан шум с обычным или резонансным возбуждением колебаний конструкции. Если динамическая реакция системы связана с обычными вынужденными колебаниями, то демпфирование, как правило, не оказывает какого-либо влияния на систему, и здесь необходи-

мо использовать такие подходы, как увеличение жесткости или введение звукоизоляции. Если конструкция такова, что ее динамическая реакция связана с резонансными явлениями, относящимися к рассматриваемой задаче, то имеется множество разнообразных методов снижения шума, к которым относится и демпфирование [5]. С этой точки зрения очень важно рассмотреть тот метод, который даст наиболее приемлемое по стоимости и затратам решение проблемы.

Излучение звука пластинами и другими простейшими формами при ударном возбуждении вызвано изгибными колебаниями, формирующимися в конструкциях. Амплитуда колебаний при возбуждении сосредоточенной силой F определится по формуле [6]

$$A = \frac{4F}{mS(\omega^2(1+\eta) - \omega_1^2)}, \quad (1)$$

где F – сосредоточенная сила, Н; m – масса на единицу поверхности, г; S – площадь поверхности, см²; ω – собственная частота колебаний пластины, Гц; η – коэффициент потерь колебательной энергии; ω_1 – частота действия возбуждающей силы, Гц.

Звуковая мощность, излучаемая под действием силы [2],

$$P = \frac{\rho c F^2}{m\omega\eta\sqrt{f_{гр}/f + 2\rho c}}, \quad (2)$$

где ρ – средняя плотность тела, г/м³; c – скорость распространения колебаний, м/с; f – текущая частота колебаний, Гц; $f_{гр}$ – граничная частота колебаний, Гц, $f_{гр} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{D}}$; D – жесткость пластины, Н/мм,

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$; E – модуль упругости материала пластины, МПа; μ – коэффициент Пуассона материала пластины; h – толщина пластины, м.

Анализ представленных формул показывает, что на звуковую мощность (уровень шума), при прочих равных условиях, оказывает влияние коэффициент потерь колебательной энергии η . Причем чем больше величина последнего, тем ниже уровень шума.

Для определения демпфирующей способности покрытий и исследования ее в зависимости от частоты, амплитуды колебаний, температуры

и характеристик демпфирующих покрытий была применена экспериментальная установка, блок-схема которой представлена на рис. 1 [7].

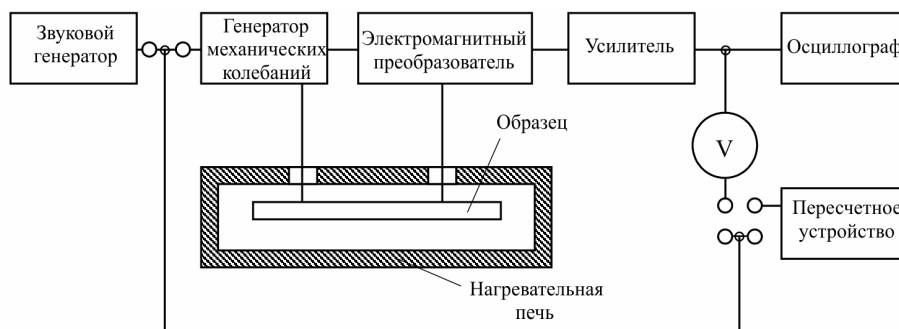


Рис. 1. Блок-схема установки для одновременного определения модулей упругости, сдвига и декремента колебаний в широком интервале температур

Электрические колебания, поступающие от звукового генератора, преобразуются в механические и подаются на образец с помощью тонкой вольфрамовой проволоки. Через такую же проволоку механические колебания подаются с образца на электромагнитный преобразователь, где они преобразуются в электрические. Полученные электрические колебания усиливаются и попадают на комплекс измерительных приборов, по данным которых измеряют модуль упругости и демпфирование колебаний измеряемого объекта. С помощью этой установки определяют модуль нормальной упругости материала образца и декремент затухания колебаний по формуле [8]

$$\delta = 1/n \ln(A_0/A_n), \quad (3)$$

где A_0 – начальная амплитуда колебаний, Гц; A_n – амплитуда n -го колебания, Гц; n – число колебаний, за которое амплитуда меняется от A_0 до A_n .

Изготовление и оценка работы демпфирующего покрытия

В литературе имеются сведения о влиянии гальванических покрытий на демпфирующие свойства, в частности, на рис. 2 представлена зависимость внутреннего трения чистого свинца (99,9 %) (кривая 1) и чистого олова (99,9 %) (кривая 2) от температуры [8, 9].

Кривая 3 описывает температурную зависимость внутреннего трения свинца Q^{-1} , покрытого тонким слоем галлия. Галлий хорошо растворяется на поверхности свинца, образуя ровный слой раствора.

Покрyтия резко увеличивают уровень внутреннего трения. Такое же влияние на характер $Q^{-1}(T)$ свинца оказывает оловянное покрытие.

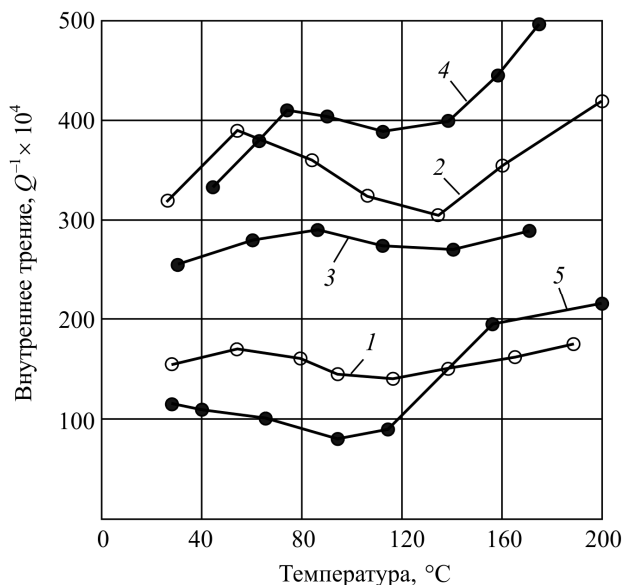


Рис. 2. Температурная зависимость внутреннего трения: 1 – чистый свинец; 2 – чистое олово; 3 – свинец, покрытый галлием; 4 – свинец, покрытый оловом механическим способом; 5 – свинец, покрытый оловом диффузионным способом

Из литературных данных также известно, что ферромагнетики характеризуются аномально большим внутренним трением, которое обусловлено магнитной структурой материала. Дополнительная диссипация энергии обусловлена потерями при переориентации доменов (область спонтанного намагничивания) в процессе колебаний [10]. Это и послужило основанием для выбора никеля как ферромагнитного материала в качестве покрытия образцов с целью исследования влияния последнего на демпфирующие характеристики при колебаниях образцов, а значит, и явления шумоглушения.

Образцы для испытаний цилиндрической формы $L = 200$ мм, $\varnothing = 8$ мм (рис. 3) были изготовлены из стали и латуни с покрытием никелем гальваническим способом. Толщина покрытия составляла 10; 20; 30; 40; 50 мкм. Для нанесения демпфирующих никелевых покрытий применялся состав электролита гальванической ванны, приведенный в табл. 1. Изменение затухания колебаний образцов после никелирования для стального (табл. 2–6) и латунного (табл. 7–11) образ-

цов практически, как показали измерения в пределах ошибки эксперимента, не зависят от толщины покрытия, поэтому графики приведены только для толщины 50 мкм (рис. 4, 5).

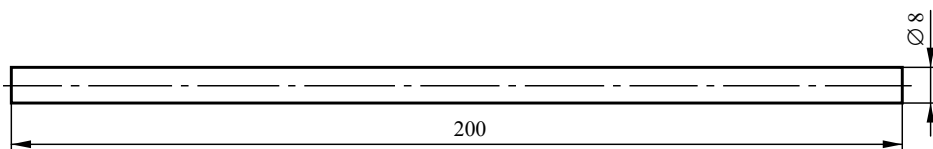


Рис. 3. Образец для эксперимента

Таблица 1

Состав электролита гальванической ванны

Состав электролита	Толщина слоя, мкм	
	10–30	40–50
Сернокислый никель $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, г/л	120	280–330
Хлористый аммоний NH_4Cl , г/л	23	35–45
Борная кислота H_3BO_3 , г/л	26	30–40
рН	5,4–6	3,5–4,5
Плотность тока, $\text{A}/\text{д}^2$	0,5–1,2	2–5
Напряжение на зажимах, В	2–2,5	2,5–3

Таблица 2

Результаты экспериментальных данных при исследовании
стального образца с покрытием толщиной 10 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
$n_{\text{исх}}$	7710	7519	7200	6540	5850	5530	5000	4200	3610	3060	2110	1120
n_{50}	5440	5224	5050	4510	4040	3880	2510	2060	1580	1190	851	559

Примечание: $n_{\text{исх}}$ – число колебаний для образца без покрытия; n_{50} – число колебаний для никелированного образца толщиной 50 мкм, Гц.

Таблица 3

Результаты экспериментальных данных при исследовании
стального образца с покрытием толщиной 20 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
$n_{\text{исх}}$	7708	7501	7200	6500	5830	5540	5010	4222	3610	3040	2150	1110
n_{50}	5404	5260	5060	4500	4000	3800	2501	2060	1580	1110	850	550

Таблица 4

Результаты экспериментальных данных при исследовании
стального образца с покрытием толщиной 30 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
$n_{\text{исх}}$	7700	7500	7200	6555	5803	5506	5078	4280	3660	3010	2110	1109
n_{50}	5478	5200	5000	4501	4060	3801	2506	2089	1501	1101	857	550

Таблица 5

Результаты экспериментальных данных при исследовании
стального образца с покрытием толщиной 40 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
$n_{\text{исх}}$	7780	7590	7200	6501	5840	5578	5000	4200	3610	3090	2101	1101
n_{50}	5445	5256	5000	4500	4010	3805	2506	2056	1500	1100	850	550

Таблица 6

Результаты экспериментальных данных при исследовании
стального образца с покрытием толщиной 50 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
$n_{\text{исх}}$	7800	7567	7300	6500	5800	5500	5100	4200	3600	3000	2100	1100
n_{50}	5500	5301	5100	4501	4000	3800	2567	2050	1501	1110	859	551

Таблица 7

Результаты экспериментальных данных при исследовании
стального образца с покрытием толщиной 10 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
n	1,1*	1,05*	1*	9330	8500	7500	6867	6070	5010	4010	3170	2050
n_{50}	6605	6500	6000	5610	5120	4500	4150	3570	3000	2510	1660	1020

Примечание к табл. 7–11: * $n \times 10^4$.

Таблица 8

Результаты экспериментальных данных латунного образца
с никелевым покрытием толщиной 20 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
n	1,1*	1,05*	1*	9300	8500	7500	6800	6000	5000	4000	3100	2000
n_{50}	6600	6500	6000	5600	5140	4500	4168	3500	3100	2560	1601	1001

Таблица 9

Результаты экспериментальных данных при исследовании
стального образца с покрытием толщиной 30 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
n	1,1*	1,05*	1*	9360	8500	7579	6800	6100	5000	4050	3110	2000
n_{50}	6640	6560	6145	5600	5134	4567	4100	3534	3020	2540	1660	1100

Таблица 10

Результаты экспериментальных данных при исследовании
стального образца с покрытием толщиной 40 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
n	1,1*	1,05*	1*	9370	8578	7512	6807	6098	5000	4010	3140	2010
n_{50}	6606	6550	6060	5660	5160	4504	4678	3507	3008	2540	1670	1010

Таблица 11

Результаты экспериментальных данных при исследовании
стального образца с покрытием толщиной 50 мкм

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
n	1,1*	1,05*	1*	9302	8560	7505	6834	6001	5000	4067	3101	2009
n_{50}	6600	6500	6000	5600	5110	4500	4101	3505	3000	2567	1670	1010

На рис. 4 и 5 представлены температурные зависимости внутреннего трения от температуры ($\delta = f(T)$) для стального (см. рис. 4) и латунного (см. рис. 5) образцов в исходном состоянии и после покрытия никелем. Как видно из рис. 4 и 5, фон внутреннего трения при низких температурах для образцов с покрытием на 30–50 % выше, чем у исходных образцов, причем это различие при температуре 300 °С достигает 100 %.

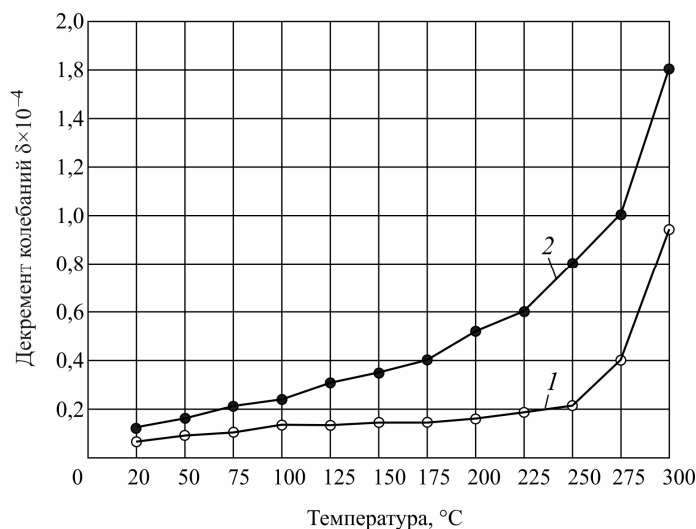


Рис. 4. Температурная зависимость декремента колебаний экспериментальных образцов из стали: 1 – без покрытия; 2 – с покрытием

Эти данные подтверждают идею об эффективности никелирования как способа повышения рассеивания энергии колебаний и, следовательно, снижения их амплитуды. Таким образом, это мероприятие должно способствовать снижению уровня шума.

Применение демпфирующих устройств для решения проблем шумоизоляции и колебаний зачастую понимается неправильно. Как можно видеть из проведенных исследований, особое внимание должно быть уделено постановке задачи, разработке конструкции демпфирующего устройства при ремонте авиационных двигателей и наземных газотурбинных установок и его изготовлению.

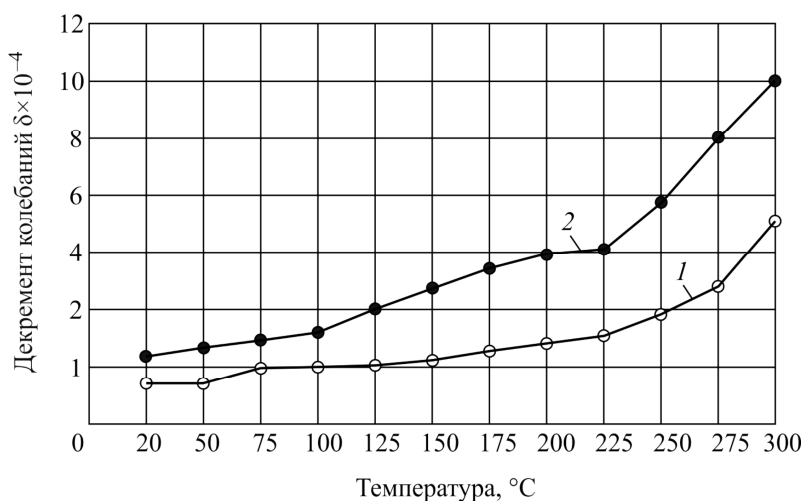


Рис. 5. Температурная зависимость декремента колебаний экспериментальных образцов из латуни: 1 – без покрытия; 2 – с покрытием

Этот процесс неизбежно оказывается длительным и многоэтапным. Следует также отметить, что оптимизация демпфирующего устройства только по параметрам демпфирования без учета влияния этого процесса на остальные параметры, определяющие форму колебаний, обычно будет вести к недостаточному или неприемлемому уменьшению шума. Следует также иметь в виду экономические проблемы, учет которых зачастую приводит к ситуациям, при которых демпфирование рассматривается как последнее средство. Однако при правильном подходе демпфирование может играть важную роль в качестве одного из наиболее удачных способов решения полной задачи шумоглушения и устранения колебаний при переходе устаревших конструкций.

Для уменьшения шума, передаваемого изготовленными из листового металла узлами типа масляных поддонов, крышек клапанов и распределительных шестерен, где демпфирование не было предусмотрено их конструкцией, необходимо установить звукоизоляцию вокруг подобных узлов. Однако многие изолирующие системы приводят при установке к утечкам шумов в стыках и в элементах конструкции, где имеются различные типы прокладок. В последнем случае при сборке таких элементов конструкции необходимо применение различных типов герметиков, клеев которые значительно повышают уровень демпфирования системы. Всякого рода ограждения не являются приемлемым решением, поскольку они утяжеляют и удорожают конструкцию, порождают проблемы изготовления и обслуживания.

Демпфирующие покрытия (толщиной 10–11 мкм), получаемые гальваническим способом, позволяют устранить все эти недостатки, за исключением увеличения расходов на материалы, но последние составляют небольшую долю полной стоимости изготовления. В ситуациях, подобных этим, введение демпфирующих прослоек является приемлемым решением, поскольку оно практичнее и экономичнее остальных решений.

Библиографический список

1. Неметаллические композиционные материалы в элементах конструкций и производстве авиационных газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, С.А. Колесников, Ю.Н. Васильев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 368 с.
2. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. – М.: Высш. шк., 1999. – 525 с.
3. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 622 с.
4. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев. – М.: Высш. шк., 2002. – 354 с.
5. Нафиш А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. – М.: Мир, 1988. – 448 с.

6. Фан Юй. Разработка и исследование металлических сплавов пониженного звукоизлучения: автореф. дис. канд. ... техн. наук. – М., 1994. – 24 с.

7. Исследование фрикционного воздействия на поверхностные слои стали методом внутреннего трения / И.Н. Аверьянов, В.Ф. Безъязычный, Б.М. Драпкин [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 10. – С. 65–66.

8. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1974. – 352 с.

9. Закощикова Е.П., Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. Влияние металлических покрытий на характер температурной зависимости внутреннего трения свинца и олова // Реакционные явления в металлах и сплавах: сб. – М.: Металлургия, 1963. – С. 101–104.

10. Бозорт Р. Ферромагнетизм. – М.: Металлургия, 1956. – 234 с.

References

1. Eliseev Yu.S., Krymov V.V., Kolesnikov S.A., Vasilev Yu.N. Nemetallicheskie kompozitsionnye materialy v elementakh konstruksiy i proizvodstve aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley [Non-metallic composite materials in the design and manufacture of aircraft gas turbine engines]. Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni N.E. Bauman, 2007. 368 p.

2. Eliseev Yu.S., Abraimov N.V., Krymov V.V. Khimiko-termicheskaya obrabotka i zashchitnye pokrytiya v aviadvigatelestroenii [Chemical heat treatment and protective coatings in aviation engineering]. Moscow: Vysshaya shkola, 1999. 525 p.

3. Eliseev Yu.S., Abraimov N.V. Khimiko-termicheskaya obrabotka zharoprochnykh staley i splavov [Chemical heat treatment of heat-resistant steels and alloys]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2001. 622 p.

4. Eliseev Yu.S., Krymov V.V., Malinovskiy K.A., Popov V.G., Yaroslavtsev N.L. Tekhnologiya ekspluatatsii, diagnostiki i remonta gazoturbinnnykh dvigateley [Technology of operation, diagnosis and repair of gas turbine engines]. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. 354 p.

5. Nafish A., Dzhouns D., Khenderson Dzh. Dempfirovanie kolebaniy [Oscillation damping]. Moscow: Mir, 1988. 448 p.

6. Fan Yuy. Razrabotka i issledovanie metallicheskikh splavov poni-zhennogo zvukoizlucheniya [Development and research of metal alloys with low sound emission]. Abstract of the thesis of the candidate of technical sciences. Moscow, 1994. 24 p.

7. Averyanov I.N., Bezyazychnyy V.F., Drapkin B.M. [et al.]. Issle-dovanie friktsionnogo vozdeystviya na poverkhnostnye sloi stali metodom vnutrennego treniya [A study of frictional effects on the surface layers with internal friction method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 1999, no. 10, pp. 65-66.

8. Postnikov V.S. Vnutrennee trenie v metallakh [Internal friction of metals]. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1974. 352 p.

9. Zakoshchikova E.P., Postnikov V.S. Vnutrennee trenie v metallakh. Vliyaniye metallicheskikh pokrytiy na kharakter temperaturnoy zavisimosti vnutrennego treniya svintsa i olova [Internal friction in metals. Influence of metal coatings on the nature of the temperature dependence of internal friction of lead and tin]. Sbornik “*Realaktsionnye yavleniya v metallakh i splavakh*”. Moscow: Metallurgiya, 1963, pp. 101-104.

10. Bozort R. Ferromagnetizm [Ferromagnetizm]. Moscow: Metallurgiya, 1956. 234 p.

Об авторах

Безъязычный Вячеслав Феокистович (Рыбинск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения» ФГОУ ВПО РГАТУ им. П.А. Соловьева (152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, e-mail: technology@rgata.ru).

Аверьянов Игорь Николаевич (Рыбинск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения» ФГОУ ВПО РГАТУ им. П.А. Соловьева (152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, e-mail: averyanov@rgata.ru).

About the authors

Vyacheslav F. Bezyazychny (Rybinsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Aviation Engines Technology and General Engineering, P.A. Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University (53, Pushkin st., Rybinsk, 152934, Russian Federation, e-mail: technology@rgata.ru).

Igor N. Averyanov (Rybinsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Aviation Engines Technology and General Engineering, P.A. Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University (53, Pushkin st., Rybinsk, 152934, Russian Federation, e-mail: averyanov@rgata.ru).

Получено 15.07.2014