

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

---

---

УДК 621.74:669.35

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОЛОКИ БрНХК-2,5-0,6-0,7 ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Силаев М.Ю.<sup>\*</sup>, Еськова Е.А.<sup>\*\*</sup>, Герус Д.С.<sup>\*\*\*</sup>, Ремшев Е.Ю.<sup>\*\*\*\*</sup>

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова,  
ул. 1-я Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, 190005, Россия*

*<sup>\*</sup> e-mail: Labmetcontrol@inbox.ru*

*<sup>\*\*</sup> e-mail: katya\_zarya@mail.ru*

*<sup>\*\*\*</sup> e-mail: gds.ru97@mail.ru*

*<sup>\*\*\*\*</sup> e-mail: Remshev@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 11.02.2019

---

Исследовалась возможность использования проволоки из никель-хром-кремниевой бронзы БрНХК-2,5-0,6-0,7 для изготовления упругих элементов, в частности винтовых пружин. Представлены результаты исследования механических характеристик бронзового сплава БрНХК с применением метода акустической эмиссии. Анализировались зависимости между параметрами акустической эмиссии и механическими характеристиками проволоки БрНХК-2,5-0,6-0,7 после реализации различных режимов термической обработки. Для установления закономерностей между параметрами акустической эмиссии и механическими характеристиками построены совмещенные диаграммы. Применяя метод акустической эмиссии, можно при растяжении образца оперативно определять размер зерна испытанного материала, что, в свою очередь, позволит прогнозировать эксплуатационные свойства готового изделия (релаксационную стойкость, ползучесть) на стадии проектирования упругих элементов, что позволит технологу выбрать оптимальный режим термической обработки без длительных исследований микроструктуры. Полученные закономерности можно использовать при входном контроле пружинных материалов для подтверждения сертификационных требований, а также для прогнозирования свойств на длительный период эксплуатации (до 25 лет).

*Ключевые слова:* упругие элементы, механические характеристики, испытания на растяжение, прочность, электромеханические системы, метод акустической эмиссии.

---

#### Введение

В авиационной и космической технике применяется большое количество электромеханических систем, одним из элементов которых является упругий элемент из бронзы, например в токосъ-

емных устройствах космического аппарата, в электрошаговых двигателях космических и авиационных систем. Материал для пружин должен удовлетворять требованиям статической, динами-

ческой, ударной и усталостной прочности, стабильности в процессе эксплуатации [1]. Изделия из бронзы характеризуются устойчивостью к температуре и трению и обладают антикоррозийными свойствами. На современном этапе развития авиации экономичность часто имеет решающее значение, и бронза в этом плане незаменима.

Из бронзовых сплавов, используемых в пружинном производстве, можно выделить три основных: БрКМц3-1 (широко применяемый сплав), БрОЦ4-3 (менее распространен) и БрБ2 (считающийся лучшим бронзовым сплавом). Широкое применение бронзового сплава БрКМц3-1 обусловлено невысокой ценой, при этом его механические и эксплуатационные свойства удовлетворяют как потребителей, так и производителей упругих элементов и пружин, так как технология изготовления упругих элементов и пружин из этого сплава кардинально не отличается от технологии изготовления упругих элементов и пружин из нагартованной проволоки, имеющей высокие физико-механические характеристики [2]. В свою очередь, сплав БрБ2 считается дефицитным и применяется только для упругих элементов и пружин, предназначенных для специальной техники, так как свойства данного сплава после упрочняющей термообработки не уступают свойствам углеродистых нагартованных сталей. Учитывая повышенную стоимость бериллия, стремятся как к снижению содержания бериллия, так и к переходу к сплавам без бериллия. Помимо этого, необходимо добавить, что достижение более высокого уровня главных свойств пружинных сплавов может быть, прежде всего, результатом изменения основного легирования сплавов, т.е. перехода к новым, часто еще не изученным системам сплавов. Сплавы системы медь – никель – кремний были охарактеризованы Корсунским (Корзоном) еще в 1930 г. Было установлено, что минимальная растворимость легирующих элементов и наиболее эффективное упрочнение в системе достигаются при соотношении Ni и Si, отвечающем стехиометрическому (4,2:1) и необходимом для образования силицида NiSi [3, 4]. Сплав БрНХК разрабатывался как конструкционный для специальных пресс-форм и штампов литья под давлением и жидкой штамповки стальных изделий довольно сложной формы. Дополнительное легирование тройного никель-кремниевого медного сплава было обусловлено необходимостью повысить его механические свойства, включая пластичность, жаропрочность, не снижая тепло- и электропроводность [5–7]. В работе исследовалась

возможность использования проволоки из бронзового сплава БрНХК-2,5-0,6-0,7 для изготовления упругих элементов, в частности винтовых пружин. Исследование является перспективным как для России, так и для зарубежных стран. В отечественном и зарубежном машиностроении широкое распространение получили неразрушающие методы контроля качества изделий [8]. Одним из этих методов и является акустическая эмиссия (АЭ) – излучение материалом механических волн, вызванных локальной динамической перестройкой его структуры. Для выбора оптимального режима термомеханической обработки упругих элементов [6, 9] исследовалось изменение механических характеристик образцов по результатам испытаний на растяжение с регистрацией параметров акустической эмиссии. Это позволит создать более адекватную модель материала при моделировании технологических процессов в САЕ-системах [10].

## Методы

Основное свойство, которым должны обладать материалы для упругих элементов, – высокое сопротивление малым пластическим деформациям в условиях кратковременного (предел упругости) и длительного (релаксационная стойкость) нагружения (табл. 1). Материал пружин, работающих в условиях высоких температур, должен быть достаточно термостойким. Свойства сплава БрНХК ниже основных показателей прочности БрБ2, что ограничивает его использование в различных узлах и приборах. Одной из задач исследования является повышение прочностных характеристик сплава БрНХК с сохранением его пластических свойств.

Испытания на статическое растяжение проводились на универсальной испытательной машине (Shimadzu AGX-100кН, Япония). Образцы от бухты отрезали с помощью ножниц с последующей правкой в приспособлении, которая не оказывала влияния на состояние поверхности и форму сечения проволоки. Образцами для испытания являлись отрезки проволоки. Начальную расчетную длину образца 200 мм (+50 мм для закрепления в захватах) измеряли с погрешностью  $\pm 0,1$  мм. Фотографии образцов представлены на рис. 1.

После правки образцы подвергались термической обработке на различных режимах. Для каждого выбранного режима старения были подготовлены по три образца, старение проводили в лабораторной печи СНОЛ – 0,2/0,3/0,5. Время выдержки и температуру контролировали с помощью

Таблица 1

## Механические свойства бронз, используемых для изготовления упругих элементов

Марка материала	Механические свойства						
	$E$ , ГПа	$G$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
БрКМЦ3-1	112	40000	750	420	5	-	8400
БрОЦ4-3	124	40000	650	520	3	-	8800
БрБ2	135	40000	1350	1200	2	-	8250
БрНХК	131	42000	800	780	10	50	8920



а)



б)

Рис. 1. Механические испытания на растяжение образцов проволоки никель-хром-кремнистой бронзы БрНХК: а — образцы проволоки до и после испытаний на растяжение; б — установка образцов на растяжение в захваты испытательной машины Shimadzu AGX-100кН

цифрового микропроцессорного регулятора температуры, позволяющего проводить термообработку с высокой точностью по заданной программе. Охлаждение образцов осуществлялось на воздухе. Для многих материалов, например с границированной кубической кристаллической решёткой, а также для материалов с высокой исходной плотностью дефектов, диаграмма имеет вид без явно выраженного предела текучести. В качестве предела текучести выбирается значение напряжения при остаточной деформации 0,2 % ( $\sigma_{0,2}$ ), такая же картина характерна и для пружинных материалов. При выборе материала и режимов термической обработки пружинных сплавов на стадии проектирования и отработки технологического процесса важно знать как показатели механических характеристик (предел пропорциональности, упругости и текучести), так и состояние структуры материала. Установление этих параметров дает возможность прогнозировать надежность эксплуатации упругих элементов (пружин) при динамических и циклических нагрузках в течение длительного срока службы. Механические характеристики определяют по методике растяжения образцов проволоки, и после этих испытаний изготавливают шлифы и оценивают микроструктуру сплава. В работе исследовали возможность установления зависимостей между параметрами акустической эмиссии и микроструктурой сплава, для этого проводили испытания на растяжение с регистрацией сигналов акустической эмиссии. Экспериментальные исследования бронзового сплава БрНХК проводились с применением оборудования ЦКП «Центр исследования материалов» Инжинирингового центра «ВОЕНМЕХ». Испытания заключались в следующем. После установления образца проволоки БрНХК в захваты испытательной машины на него устанавли-

ливался датчик акустической эмиссии прибора «Локтон» (рис. 2). В процессе растяжения фиксировали параметры акустической эмиссии и показатели механических свойств. Целью этого эксперимента является исследование возможности определения показателей микроструктуры по параметрам акустической эмиссии.

По результатам механических испытаний исследовали параметры акустической эмиссии, та-

кие, как суммарная акустическая эмиссия  $N$  и максимальное значение амплитуды импульса  $(A_{\sigma_{0,2}})_{\max}$  до достижения значения условного предела текучести. Регистрация параметров суммарной акустической эмиссии и амплитуды импульсов представлены на рис. 3.

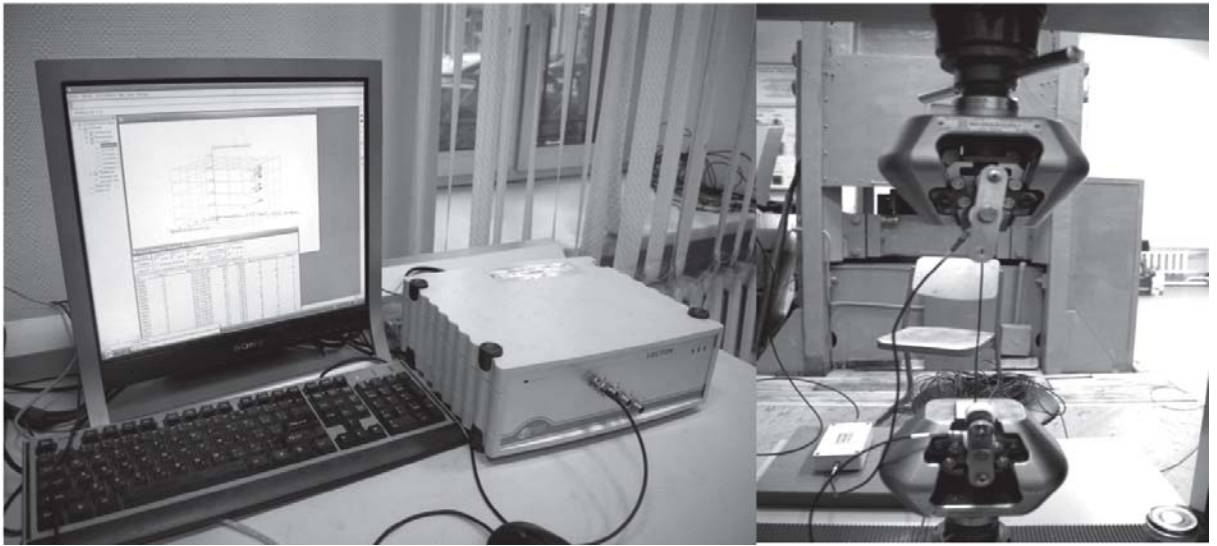


Рис. 2. Прибор акустической эмиссии, образец в захватах в процессе испытаний проволоки БрНХК

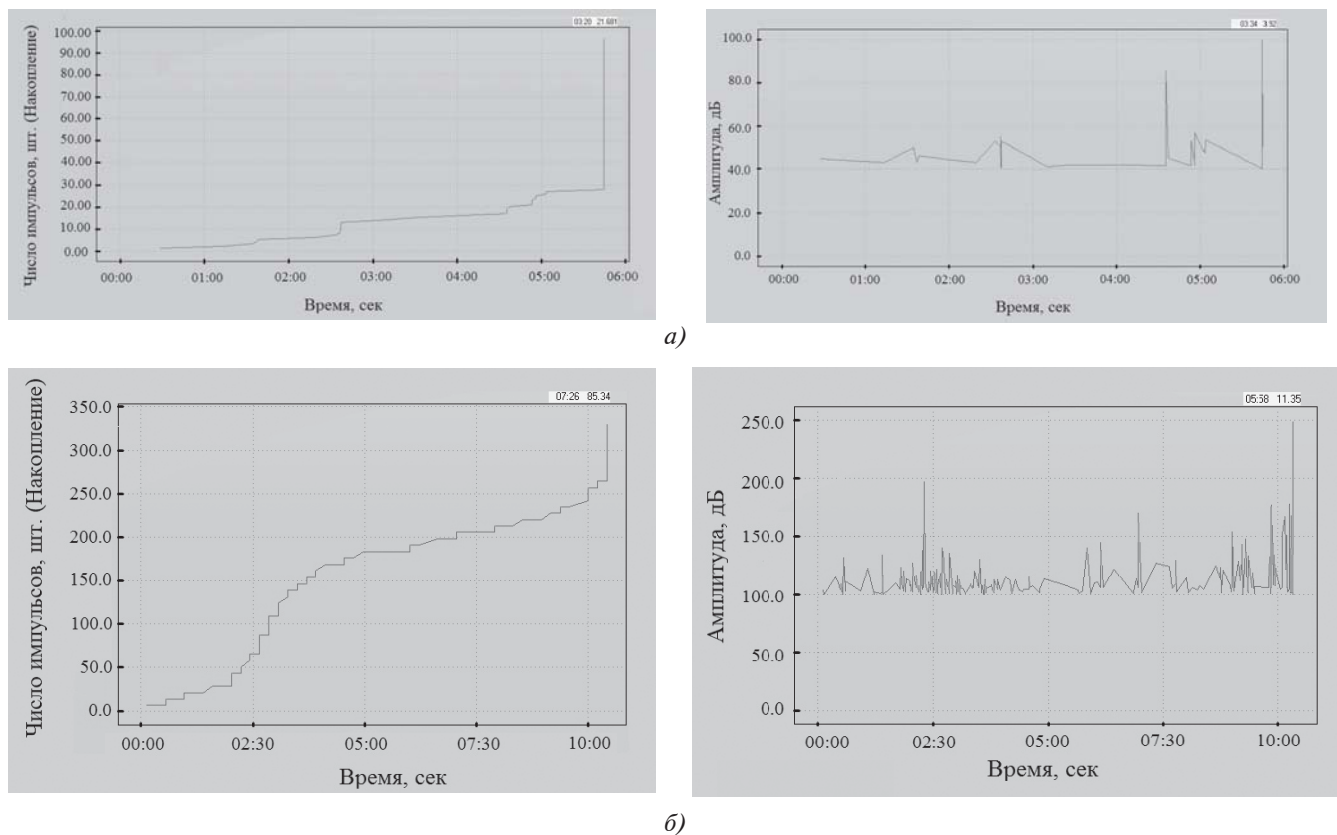


Рис. 3. Параметры акустической эмиссии в процессе растяжения образцов: *a* — исходное состояние, *б* — старение 440°С 2 часа



## Результаты

Результаты механических испытаний образцов БрНХК после реализации различных режимов старения представлены в табл. 2.

Для установления зависимости между параметрами акустической эмиссии и механическими характеристиками построены совмещенные диаграммы (рис. 4). Рассматривали распределение энергии акустической эмиссии (максимальное значение амплитуды импульсов) в процессе растяжения образцов после различной термообработки.

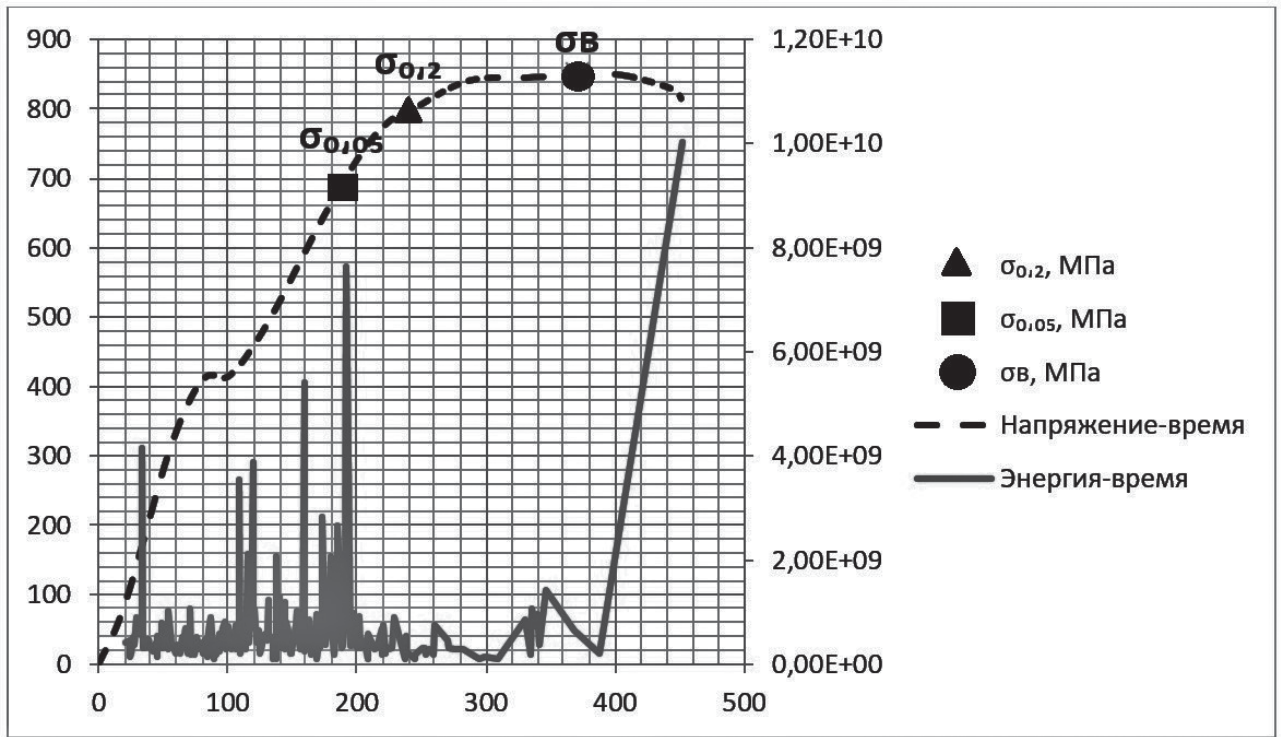
Применение старения обеспечивает повышение прочностных характеристик сплава по сравнению с состоянием поставки. Предел текучести

( $\sigma_{0,2}$ ) при старении при температуре 440°C в среднем в течение старения 1,5–2,5 ч возрастает в среднем на 46,6% и максимального значения  $\sigma_{0,2} = 838$  МПа достигает при времени старения 2 ч, максимальные значения предела упругости  $\sigma_{0,05} = 772$  МПа также достигаются при старении при температуре 440°C в течение 2 ч. Наибольший прирост (50,8%) предела упругости ( $\sigma_{0,05}$ ), если сравнивать все режимы старения (440°C, 465°C, 480°C), достигается при температуре старения 440°C в течение 2 ч. Увеличение времени старения с 1,5 до 2,5 ч приводит к росту предела проч-

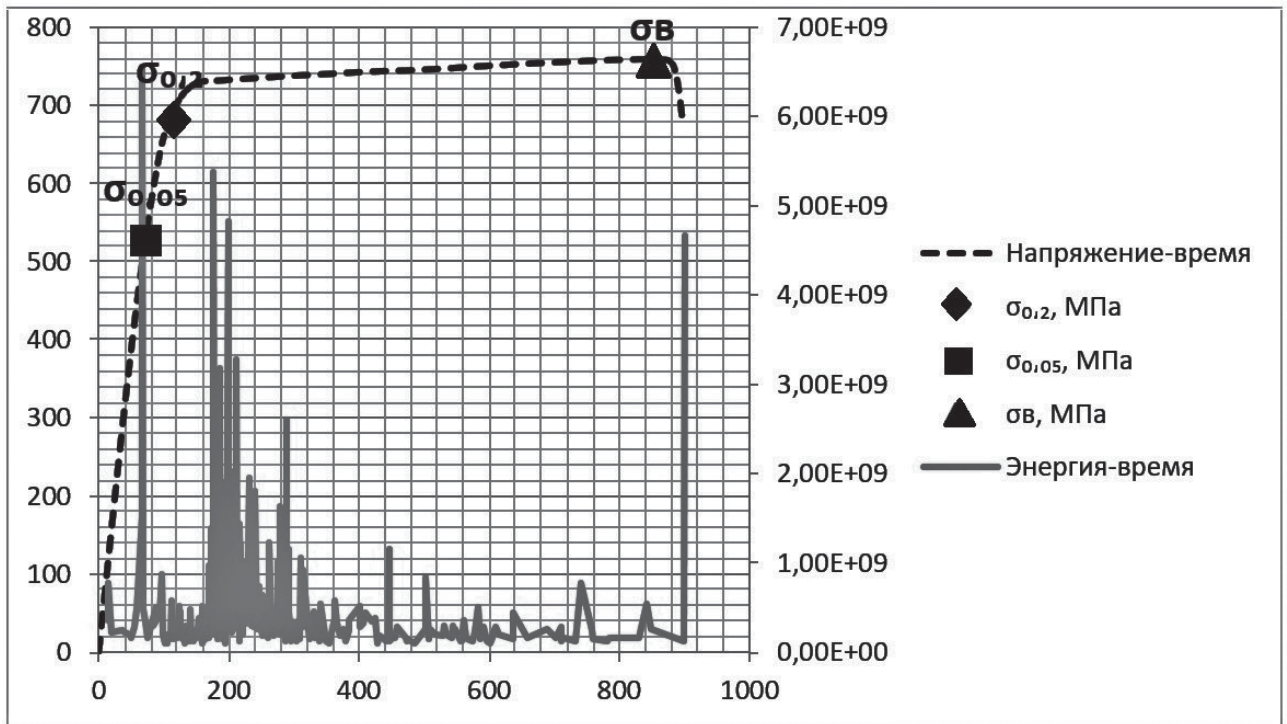
Таблица 2

Механические свойства бронзового сплава БрНХК после термообработки при различных режимах

№ образца	Состояние, режим ТО	Механические характеристики (растяжение)			
		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,05}$ , МПа
1	Старение при 380 °С, выдержка 1,5 ч.	762	772	3,82	750
2		807	815	4,82	790
1	Старение при 380 °С, выдержка 2 ч.	801	814	3,89	773
2		755	778	4,31	728
1	Старение при 380 °С, выдержка 2,5 ч.	845	852	3,1	821
2		851	866	4,31	804
1	Старение при 380 °С, выдержка 3 ч.	824	850	3,57	736
2		821	843	4,33	756
1	Старение при 380 °С, выдержка 3,5 ч.	785	800	3,79	765
2		803	827	6,16	757
1	Старение при 480 °С, выдержка 3 ч.	672	750	10,09	602
2		705	767	9,72	671
1	Старение при 480 °С, выдержка 3,5 ч.	639	712	9,26	589
2		688	760	8,84	648



а)



б)

Рис. 4. Совмещенные диаграммы механических характеристик и параметров акустической эмиссии ( $\sigma$ ,  $E-t$ ) образцов проволоки БрНХК после старения при температуре 440°C в течение 1,5 ч: а — образец №1; б — образец №3

ности ( $\sigma_{в}$ ) от 15,7 до 20,4%, и средние значения распределены следующим образом:  $\sigma_{в}$  (1,5 ч) = 808 МПа;  $\sigma_{в}$  (2 ч) = 840,7 МПа;  $\sigma_{в}$  (2,5 ч) = 855,7 МПа. При увеличении времени старения

до 2,5 ч  $\sigma_{в}$  снижается при температурах 465 и 480°C, при 440°C наблюдается незначительный (не более 2%) прирост по сравнению со старением в течение 2 ч. Относительное удлинение  $\delta$  в процессе старения при температуре 440°C не превы-

шает 6% по среднему показателю. При увеличении температуры старения происходит незначительный прирост относительного удлинения у образцов после растяжения.

Характерным для всех образцов, испытанных на растяжение с регистрацией параметров акустической эмиссии, является максимальный уровень энергии акустической эмиссии (амплитуды импульса) до достижения значения условного предела текучести. Параметры этого сигнала значительно отличаются от всех остальных, что дает основания предположить потерю устойчивости в этот момент времени. Можно сделать предположение о том, что возникновение сигнала с максимальным значением амплитуды является началом микропластической деформации. Значения суммарной акустической эмиссии, зарегистрированной в процессе растяжения образцов, а также максимальные значения амплитуды импульсов до достижения условного предела текучести представлены в табл. 3.

### Обсуждение

В физике прочности установлены закономерности влияния размеров зерна поликристаллических материалов на механические свойства, в частности на их пластические и прочностные характеристики, что было доказано многочисленными экспериментальными исследованиями и теоретическими обоснованиями. Наблюдаемые закономерности сводятся к выполнению известного математического соотношения:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести;  $d$  — размер зерна;  $\sigma_0$ ,  $k$  — параметры материала.

Авторство этого соотношения принадлежит Холлу и Петчу [12, 13]. Соотношение (1) выполняется в широком интервале размера зерна от  $10^{-8}$  до  $10^{-2}$  м и при различных степенях деформации вплоть до разрушения. К настоящему времени достигнуты большие успехи в получении материалов с различными размерами зерен, влияющими на  $\sigma_0$  ( $\sigma_0$  — напряжение, соответствующее началу скольжения дислокаций) и  $k$  и зависящими от типа материала (металл или сплав), текстуры, наличия сегрегаций или выделений на границе зерен и т.д. Изменение размера зерна приводит к изменению его дефектной структуры, а в приграничной зоне — к изменению внутреннего напряжения, механизмов деформации и источников дислока-

ций и др. [14, 15]. Проведенный эксперимент позволяет предположить, что максимальное значение амплитуды импульса до достижения предела текучести ( $A_{\sigma_{0,2}})_{\max}$ , зафиксированное для всех испытанных образцов при построение совмещенной диаграммы, и является значением  $\sigma_0$ . Таким образом, акустико-эмиссионное сопровождение механических испытаний на растяжение может служить оперативным способом определения размера зерна пружинных материалов при различных режимах термической и термомеханической обработки. Тогда зависимость Холла—Петча примет вид

$$\sigma_T = \sigma_{(A_{\sigma_{0,2}})_{\max}} + \frac{k}{\sqrt{d}}; \quad (2)$$

$$\sigma_{(A_{\sigma_{0,2}})_{\max}} = \sigma_0, \quad (3)$$

где  $\sigma_{(A_{\sigma_{0,2}})_{\max}}$  — напряжение, соответствующее началу микропластической деформации, определяемое методом акустической эмиссии.

### Выводы

Наилучшим режимом термической обработки проволоки из сплава БрНХК, предназначенного для изготовления упругих элементов, в частности винтовых пружин, является закалка + пластическая деформация с последующим старением при  $440^\circ\text{C}$ . Такой режим позволяет получить в сплаве благоприятную однородную структуру с укрупнением субзерен и достичь сочетания механических свойств, обеспечивающего высокие прочность, текучесть, а следовательно, и релаксационную стойкость, достаточный запас пластичности, а именно: предел прочности  $\sigma_B$  850—860 МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2}$  830—840 МПа, относительное удлинение  $\delta \sim 5$ —7. Повышение температуры старения в исследованном интервале приводит к увеличению пластичности сплава при снижении прочности не более чем на 10%. Стандартная термическая обработка БрНХК (исх. + старение при температуре  $440^\circ\text{C}$  в течение 1,5—2—2,5—3 ч — СТО) обеспечивает повышение механических свойств сплава с увеличением продолжительности старения до 2,5 ч за счет выделения дисперсных фаз силицида никеля  $\text{Ni}_2\text{Si}$ . С увеличением продолжительности старения до 3 ч при некотором росте  $\sigma_B$  наблюдается снижение  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_{0,05}$

Таблица 3

Экспериментальные результаты исследования закономерностей изменения параметров акустической эмиссии, механических свойств и микроструктуры образцов проволоки БрНХК после термической обработки при различных режимах

Режим обработки	№ образца	Параметры акустической эмиссии		Параметры механических свойств			
		Суммарная акустическая эмиссия в процессе растяжения образца $N$ , имп.	Максимальное значение амплитуды до достижения условного предела текучести $(A_{\sigma_{0,2}})_{\max}$ , дБ	Условный предел упругости $\sigma_{0,05}$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
Исходное состояние	1	28	52	495	591	709	2,86
	2	88	52	288	321	663	3,27
Старение при 440°C 1,5 ч	1	2000	65	757	798	850	3,76
	3	2021	67	702	725	760	7,48
Старение при 440°C 2 ч	1	252	80	812	838	860	5,15
	2	153	52	800	807	812	1,64
Старение при 440°C 2,5 ч	1	200	51	826	847	858	2,16
	2	270	62	786	820	853	5,66
Старение при 465°C 1,5 ч	1	600	62	729	752	797	4,53
	3	250	62	778	807	843	5,93
Старение при 465°C 2 ч	2	600	78	772	801	834	6,14
	3	500	62	733	776	830	7,62
Старение при 465°C 2,5 ч	1	800	62	691	762	839	4,61
	3	2500	80	750	769	810	8,02
Старение при 480°C 1,5 ч	2	350	82	719	747	793	7,59
	3	301	65	797	751	797	4,26
Старение при 480°C 2 ч	1	352	57	720	733	781	4,19
	3	1602	65	707	762	820	5,73
Старение при 480°C 2,5 ч	2	270	67	739	768	808	4,81
	3	150	75	685	703	760	6,07



при значительном повышении относительного удлинения, что связано с коагуляцией дисперсных фаз. В производстве применяют следующие методы контроля и испытаний пружин: визуальный контроль, контроль соответствия чертежу детали (шероховатость, твердость, геометрические параметры), испытание на сжатие, циклическую выносливость, различные методы дефектоскопии [15]. Перспективным является применение метода акустической эмиссии на стадии входного контроля материала, а также выбор режима термомеханической обработки упругого элемента. Метод акустической эмиссии используется для оценки поведения материала при режимах статического и квазистатического нагружения. Данный метод позволяет обнаружить и зарегистрировать только развивающиеся дефекты [16–19].

В процессе развития металловедения [20] появится возможность с помощью метода АЭ в короткие сроки определить размер зерна материала без изготовления шлифа, необходимого при проведении металлографического исследования. Оценка размера зерна материала является важной задачей, поскольку размер зерна — параметр микроструктуры материала, а микроструктура, как известно, определяет свойства готового изделия, в нашем случае релаксационную стойкость, ползучесть. Это, в свою очередь, позволит технологу еще на начальном этапе изготовления упругих элементов определить оптимальный режим термической обработки. Закономерности, обнаруженные в ходе исследования, можно использовать при входном контроле пружинных материалов для прогнозирования свойств при изготовлении и эксплуатации упругих элементов.

### Библиографический список

1. *Арсентьева Н.С., Боков Н.Ф., Казанцев Е.А., Железняк Л.М., Марущак Л.Н., Бекленищева Г.В., Ломакина К.А.* Высококачественная проволока из электротехнических бронз производства ОАО «КУЗОЦМ» // *Металлург.* 2009. № 12. С. 62–65.
2. *Железняк Л.М., Замараев В.А., Марущак Л.Н.* Особенности производства бронзовой проволоки, отвечающей требованиям высокого уровня // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением.* 2017. № 9. С. 30–37.
3. *Bespalov D.A., Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Pekhov V.A.* Influence of heat treatment on the properties of nickel–chromium–silicon bronze wire // *Russian engineering research.* 2018. Vol. 38. No. 1, pp. 29–32. DOI: 10.3103/S1068798X18010069
4. *Kareva N.T., Koryagin Yu.D.* Thermomechanical treatment of aging aluminum alloys // *Metal Science and Heat Treatment.* 2015. Vol. 56. No. 9–10, pp. 483–488. DOI: 10.1007/s11041-015-9786-5
5. *Вульф Б.К., Ромадин К.П.* Авиационное материаловедение. — М.: Машиностроение, 1967. — 391 с.
6. *Matsumoto F.* The influence of the degree of deformation in cold drawing and aging modes on the strength of the alloy wire // *Iron and Steel Institute of Japan.* 1987. Vol. 73. No. 5, pp. 671–699.
7. *Barel E., Hamu G.B., Eliezer D., Wagner L.* The effect of heat treatment and HCF performance on hydrogen trapping mechanism in timetal LCB alloy // *Journal of Alloys and Compounds.* 2009. Vol. 468. No. 1–2, pp. 77–86. DOI: 10.1016/j.jallcom.2007.12.104
8. *Иванов Д.А., Засухин О.Н.* Использование пульсирующего дозвукового газового потока для повышения эксплуатационных свойств металлических изделий // *Технология металлов.* 2015. № 1. С. 34–38.
9. *Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Silaev M.Yu.* Ensuring the Operational Reliability of Elastic Elements by Acoustic Methods // *Metallurgist.* 2015. Vol. 59. No. 3–4, pp. 225–228. DOI: 10.1007/s11015-015-0088-3
10. *Шмаков А.К., Мироненко В.В., Колмогорцев И.В.* Испытания материалов для обеспечения работы программных средств моделирования технологических процессов обработки // *Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов: Материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара (Иркутск, 9–11 ноября 2011).* — Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2011. С. 130–137.
11. *Hall E.O.* The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results // *Proceedings of the Physical Society. Section B.* 1957, pp. 747–753.
12. *Petch N.J.* The cleavage strength of polycrystals // *Journal of the Iron and Steel Institute.* 1954. Vol. 174, pp. 25–28.
13. *Конева Н.А., Жданов А.Н., Козлов Э.В.* Физические причины высокой прочности ультрамелкозернистых материалов // *Известия Российской академии наук. Серия физическая.* 2006. Т. 70. № 4. С. 577–580.
14. *Козлов Э.В., Жданов А.Н., Конева Н.А.* Измельчение размера зерна как основной ресурс повышения предела текучести // *Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки.* 2003. Т. 8. № 4. С. 509–513. DOI: 10.0000/cyberleninka.ru/article/n/izmelchenie-razmera-zerna-kak-osnovnoy-resurs-povysheniya-predela-tekuchesti
15. *Андреева Л.Е.* Упругие элементы приборов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1981. — 392 с.
16. *Калугина М.С., Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А., Воробьева Г.А., Тельнов А.К.* Способ упрочнения легких сплавов аэротермоакустической обработкой в авиационной ракетостроении // *Вестник Московского авиационного института.* 2018. Т. 25. № 2. С. 230–239.
17. *Калугина М.С., Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А., Воробьева Г.А., Пехов В.А.* Комбинированный термоакустический способ модификации структуры титано-

- вого сплава // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 185-196.
18. Воробьева Г.А., Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А., Беспалов Д.А. Влияние режимов термической и аэротермоакустической обработок на структуру бронзы БрНХК // Металлург. 2018. № 3. С. 89-94.
  19. Беспалов Д.А. Исследование возможностей сплава БрНХК для изготовления винтовых пружин // Металлообработка. 2017. № 6(102). С. 24-29.
  20. Пастухова Ж.П., Рахматд А.Г. Пружинные сплавы цветных металлов. — 2-е изд. — М.: Металлургия, 1983. — 363 с.

## ACOUSTIC EMISSION METHOD APPLICATION WHILE DETERMINING MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE BRNICRSI-2,5-0,6-0,7 WIRE FOR ELASTIC ELEMENTS PRODUCTION

Silaev M.Yu.\* , Es'kova E.A.\*\* , Gerus D.S.\*\*\* , Remshev E.Yu.\*\*\*\*

*Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D.F. Ustinov,  
1, Krasnoarmeiskaya str., Saint Petersburg, 190005, Russia*

\* e-mail: Labmetcontrol@inbox.ru

\*\* e-mail: katya\_zarya@mail.ru

\*\*\* e-mail: gds.ru97@mail.ru

\*\*\*\* e-mail: Remshev@mail.ru

### Abstract

A great number of electromechanical systems, an important part of which represents an elastic element from bronze, are applied in aerospace technology.

Severe requirements are placed to the physico-mechanical characteristics of these parts. The existing standard methods for mechanical properties determining are not sufficient for such products.

Acoustic emission method is one of the promising methods to solve this problem.

Acoustic emission is radiation of mechanical waves by the material, caused by local dynamic rearrangement of its structures. This method is non-destructive.

Beryllium bronze is used as a rule in special products. This project studies a cheaper substitute for Nickel-chromium-siliceous bronze.

Besides, mechanical tensile tests of the wire with parameters registration of acoustic emission were being conducted. Bronze was subjected to various heat treatment to select the optimal mode.

As the result of this work, the microstructure of the samples was studied for various thermal treatment modes. It was revealed that the acoustic emission parameters were the figures of strength and plasticity.

The strength and plastic characteristics are related to the grain size by the dependence proposed by Hall-Petch. This dependence modernization allowed adopt the stress at maximum value of the pulse amplitude up to the yield point achieving as the stress corresponding to the dislocations motion start.

The possibility of determining the microplastic deformation starting of wire samples by AE method was established. Based on the obtained regularities, it was revealed that the number of signals is a characteristic of strength, while the amplitude is a characteristic of plasticity. The Hall-Petch dependence modernization may allow developing a technique for operational control of microstructure in the release of special products.

**Keywords:** elastic elements, mechanical characteristics, tensile tests, strength, electromechanical systems, acoustic emission method.

### References

1. Arsent'eva N.S., Bokov N.F., Kazantsev E.A., Zheleznyak L.M., Marushchak L.N., Beklenishcheva G.V., Lomakina K.A. *Metallurg*, 2009, no. 12, pp. 62-65.
2. Zheleznyak L.M., Zamaraev V.A., Marushchak L.N. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2017, no. 9, pp. 30-37.
3. Bespalov D.A., Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Pekhov V.A. Influence of heat treatment on the properties of nickel-chromium-silicon bronze wire. *Russian engineering research*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 29-32. DOI: 10.3103/S1068798X18010069
4. Kareva N.T., Koryagin Yu.D. Thermomechanical treatment of aging aluminum alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 56, no. 9-10, pp. 483-488. DOI: 10.1007/s11041-015-9786-5

5. Vul'f B.K., Romadin K.P. *Aviatsionnoe materialovedenie* (Aviation engineering), Moscow, Mashinostroenie, 1967, 391 p.
6. Matsumoto F. The influence of the degree of deformation in cold drawing and aging modes on the strength of the alloy wire. *Iron and Steel Institute of Japan*, 1987, vol. 73, no. 5, pp. 671-699.
7. Barel E., Hamu G.B., Eliezer D., Wagner L. The effect of heat treatment and HCF performance on hydrogen trapping mechanism in timental LCB alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 468, no. 1-2, pp. 77-86. DOI: 10.1016/j.jallcom.2007.12.104
8. Ivanov D.A., Zasukhin O.N. *Tekhnologiya metallov*, 2015, no. 1, pp. 34-38.
9. Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Silaev M.Yu. Ensuring the Operational Reliability of Elastic Elements by Acoustic Methods. *Metallurgist*, 2015, vol. 59, no. 3-4, pp. 225-228. DOI: 10.1007/s11015-015-0088-3
10. Shmakov A.K., Mironenko V.V., Kolmogortsev I.V. *Vysokoehffektivnye tekhnologii proektirovaniya, konstruktorsko-tekhnologicheskoi podgotovki i izgotovleniya samoletov: materialy vserossiiskogo s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskogo seminara (Irkutsk, 9-11 November 2011)*, Irkutsk, IRGTU, 2011, pp. 130-137.
11. Hall E.O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1957, pp. 747-753.
12. Petch N.J. The cleavage strength of polycrystals. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1954, vol. 174, pp. 25-28.
13. Koneva N.A., Zhdanov A.N., Kozlov Eh.V. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*, 2006, vol. 70, no. 4, pp. 577-580.
14. Kozlov E.V., Zhdanov A.N., Koneva N.A. *Vestnik tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2003, vol. 8, no. 4, pp. 509-513. DOI: 10.0000/cyberleninka.ru/article/n/izmelchenie-razmera-zernakak-osnovnoy-resurs-povysheniya-predela-tekuchesti
15. Andreeva L.E. *Uprugie ehlementy priborov* (Elastic elements of instruments), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 392 p.
16. Kalugina M.S., Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Telnov A.K. A method of light alloys reinforcing by aero-thermoacoustic treatment for aerospace industry. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 230-239.
17. Kalugina M.S., Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Pekhov V.A. Combined thermoacoustic method for titanium alloy structure modifying. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 185-196.
18. Vorob'eva G.A., Remshev E.Yu., Danilin G.A., Bepalov D.A. *Metallurg*, 2018, no. 3, pp. 89-94.
19. Bepalov D.A. *Metalloobrabotka*, 2017, no. 6(102), pp. 24-29.
20. Pastukhova Zh.P., Rakhshad A.G. *Pruzhinnye splavy tsvetnykh metallov* (Rostad spring alloys of non-ferrous metals), Moscow, Metallurgiya, 1983, 363 p.