

УДК:669.620.14.0.18.44

В.А. Скуднов<sup>1</sup>, С.В. Харитонов<sup>2</sup>**СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛИНВАРНОГО СПЛАВА 44НХТЮ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ЦЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА ИЗ ОДНОЙ ЗАГОТОВКИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
ОАО «Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА»»

Содержит результаты исследования структуры (фазового состава, величины зерна, физико-механических свойств (упругих модулей, плотности, показателей прочности, пластичности, элинварного сплава 44НХТЮ, релаксационной способности и др.) после 12 режимов комплексной термической (закалки, старения-основного, стабилизирующего, для снятия напряжений), электроэрозионной обработки чувствительного элемента в цельном корпусе гироскопа, выполненного из одной заготовки. Результаты получены микроструктурным, электронноскопическим, рентгеноструктурным, ультразвуковым резонансным, механическими методами испытаний при температурах от +100<sup>0</sup> до – 60<sup>0</sup> С на образцах и натуральных перемычках, подтвердивших требую работоспособность изделия на промышленных стендах предприятия.

*Ключевые слова:* сплав 44НХТЮ, термообработка, структура, механические свойства, , цельный корпус, технология, гироскоп.

**Актуальность проблемы.** Гироскопы предназначены для высокоточного наведения управляемых объектов при удержании неизменного положения собственной оси вращения относительно инерциального пространства путем противостояния действиям вредных моментов от различных энергий (механической, вибрационной, ударной, тепловой, электромагнитной) при эксплуатации в жестких условиях: (широкополосная случайная вибрация (ШСВ) со среднеквадратичным ускорением  $\varepsilon = 13g$  при частотах  $\Delta f = 20 - 20000$  Гц; при ударах и виброударах с ускорениями до 80 g) Требуемая стабильность работы в течение 12-13 лет должна обеспечиваться сохранением элинварных свойств в диапазоне температур от -60<sup>0</sup> до 85<sup>0</sup>С, при динамических нагрузках и др. Поэтому к надежности структуры, физико-механическим свойствам материала упругих элементов и всей конструкции в целом предъявляются высокие требования.

Сегодня основное требование состоит в том, чтобы перейти от сборных конструкций гироскопов к цельной, выполненной из одной заготовки. Решение такой сложной задачи потребовало создание новой комплексной технологии изготовления, включающей выбор элинварного материала, режимов термической обработки, создающих гарантированную структуру и соответствующие физико-механические свойства в диапазоне указанных температур и динамических скоростей нагружения, применения автоматизированной электроэрозионной обработки для выполнения тонких крестообразных перемычек толщиной 0,065 мм с одинаковой шероховатостью их поверхностей, выполненных в цельном корпусе гироскопа, Применяемые ранее материалы бронза БрБ2, 36НКВХБТЮ-ВИ и др. и технологии их обработки имели ряд недостатков: высокие температурный коэффициент модуля упругости (ТКМУ), несовершенство процессов механической обработки, сборка с применением ручных операций, низкий процент выхода годных изделий, низкая производительность труда. Поэтому создание корпуса гироскопа с новым чувствительным элементом из элинварного сплава представляет сложную научно-техническую задачу, при решении которой металлургические аспекты оказались первичными, поскольку структура сплава дисциплинирует работу конструкторов, технологов, производство и надежность изделия в целом.

**Материал и методика исследований.** Для изготовления новой конструкции гироскопов типа РВГ-МХ, РВГ-7 выбран высокотехнологичный элинварный дисперсионно-

твердеющий железоникелевый сплав 44НХТЮ аустенитного класса, сохраняющий температурную стабильность модуля упругости во всем эксплуатационном интервале температур. Гироскопы данного типа являются гироскопами с внутренним кардановым подвесом, в качестве рабочих элементов которого используются упругие торсионы. Для минимизации «вредных» моментов, создаваемых упругими силами подвеса, необходимо уменьшать толщину его элементов, но без снижения прочности материала. Поэтому достижение баланса прочности, структуры, эливарности свойств, размеров в новой технологии изготовления чувствительного элемента гироскопа явилось актуальной задачей для обеспечения его надежности.

**Цель работы:** разработка оптимального структурно-энергетического состояния эливарного сплава 44НХТЮ и создание новой комплексной технологии изготовления чувствительных упругих элементов в цельной конструкции гироскопов типов РВГ-1МХ, РВГ-7 с использованием технологий термической, пластической, механической, электроэрозионной и контрольных обработок, отвечающих требованиям ТУ к изделию.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выбор современных методов исследования: оптическую и растровую микроскопию, фрактографию изломов, рентгеновские, релаксационные, акустические, механические и другие для изучения структуры (величины и однородности зерен, интерметаллических включений), фазового состава сплава 44НХТЮ после каждой стадии обработки для установления оптимального состояния.

2. Исследование и изучение:

- влияния термической (режимов закалки, старения, отпуска), пластической, электроэрозионной обработок на структуру, механические, акустические свойства, микропластичность, фазовый состав, плотность сплава 44НХТЮ в последовательности выбранного маршрута изготовления упругого элемента в виде крестообразных перемычек толщиной 0,065 мм, шириной 0,12 мм в цельной заготовке.
- влияния толщины перемычек, низких температур, динамических нагрузок на предельные механические характеристики, работу характер разрушения, фрактографии изломов сплава;
- релаксационных свойства сплава в различных структурных состояниях в последовательности прохождения операций термической и пластических обработок, влияющих на временную стабильность структуры при разных нагрузках, отвечающих условиям эксплуатации гироскопа.
- характера разрушения крестообразных перемычек, являющихся упругими элементами натуральных гироскопов при специальном разрыве их конструкции.

3. Разработка и освоение на предприятии новой технологии получения оптимального структурно-энергетического состояния и контроля физико-механических свойств сплава 44НХТЮ, организации серийного производства качественных чувствительных элементов гироскопов новой конструкции из одной заготовки, работоспособность которых подтверждена на промышленных стендах предприятия, а также при эксплуатации изделия.

**Методы и объекты исследования:** статические и динамические механические испытания на растяжение при температурах от 20<sup>0</sup> до -60 С по ГОСТ 1497 цилиндрических образцов, (тип 3,  $d = 6$  мм) растяжение специальных плоских образцов с соотношением ширины и толщины от 1 до 100 на машине УМЭ-10ТМ, фрактография изломов специальных плоских образцов, а также образцов по ГОСТ 1497 (тип 3, режим 4-2.); измерения твердости на приборе Бринелля; динамические испытания на растяжение цилиндрических образцов при низких температурах до -60<sup>0</sup>С на копке МК-30, оснащенной автономной охлаждающей камерой и специальным устройством для закрепления образцов в маятнике; оптическая (микроскопы МБС-10 (x100), МИМ-7(x200-360), растровая микроскопия (РЭМ SAMSUNG SEM15 (x600...1600) изломов образцов и натуральных чувствительных элементов; измерения релаксации напряжений на цилиндрических образцах  $d = 6$  мм,  $h = 3$  мм, на машине высокой жесткости (релаксометре) с шагом нагружения 20 Мпа и временем релаксации 120 с с записью

диаграмм на программном комплексе АУР 1; рентгеновский фазовый анализ на установке ДРОН-2 (материал анода – Fe; напряжение  $U = 25$  кВ; сила тока  $I = 0,5$  мА; используемые щели 1 мм и 2 мм), измерение упругих модулей акустическими волнами резонансной частоты на специальной установке «Астрон» (образцы  $d = 15$  мм,  $h = 6$  мм, взятых после всех режимов термической обработки); электроэрозионная выборка окон упругого элемента и поверхностей крестообразных перемычек на специальном станке; испытания в условиях широкополосной случайной вибрации (ШСВ) со среднеквадратичным ускорением  $\varepsilon = 13$  g при частоте  $\Delta f = 20 - 20000$  Гц в течение  $t = 300$  с; также в условиях ШСВ при  $\varepsilon = 30$  g при частоте  $\Delta f = 20 - 20\ 000$  Гц в течение  $t = 3$  с; при ударе с ускорением 80 g с частотой 6 циклов в течение  $t = 2-6$  мс, а также при виброударе при 80 g с частотой 6 циклов в течение  $t = 20 - 200$  мс для проверки достаточности механической прочности изделия на специальных стендах.

### Результаты исследования

Значения ТКЧ сплава приведены в табл.1, Видно, что его изменения в диапазоне рабочих температур у 44НХТЮ составляют - 0,142 %; Бр.В2: -1,661 %. Сплав 36НКВХБТЮ-ВИ:-0,08 не подходит по магнитным характеристикам. Пробная технология изготовления чувствительных элементов цельной конструкции нового гироскопа из одной заготовки заключается в последовательности операций: контроль закупленного материала на соответствие сертификату); токарная (изготовление цилиндров для изделия и образцов свидетелей для ТО), промывка, первичная ТО (закалка); вторичная ТО (старение двух ступенчатое); контроль твердости; расточки отверстий; слесарные зачистки заусенцев; маркировки; промывки, доводки размеров; окончательная ТО (старение); контроль твердости поверхностей «подвеса»; автоматизированная ЭЭО перемычек; контроль размеров перемычек; промывка; стабилизация структуры при 60<sup>0</sup>С; контроль; промывка; консервация в спец тару; новая технология сборки; проверка работоспособности изделия на стендах предприятия.

Таблица 1

#### Значения ТКЧ эливарных сплавов при разных температурах

Рабочая температура, °С	-60	-40	-20	0	20	40	60
44НХТЮ: ТКЧ (%)	0,1	0,01	-0,01	0	0,02	0,05	0,07
Бр.В2: ТКЧ (%)	1,15	0,80	0,55	0,27	0,02	-0,20	-0,55
36НКВХБТЮ-ВИ	-0,05	0	-0,01	0	- 0, 02	-0,05	0,1

В табл. 2 приведены режимы первичной, промежуточных и окончательной ТО.

Таблица 2

#### Режимы термической обработки образцов из сплава 44НХТЮ

№ режима, № рис.	Режимы термообработки
1	2
	<i>Режимы первичной термообработки</i>
1. Рис .1,а	Закалка образцов при температуре 940-960 <sup>0</sup> С, выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, 50.образцов
1-2	Закалка образцов при температуре 850-900 <sup>0</sup> С, выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, 5 образцов
1-3	Закалка образцов при температуре 950-1000 <sup>0</sup> С, выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, 5 образцов
	Режимы 1-й промежуточной термообработки

Окончание табл. 2

1	2
2	Закалка образцов при температуре 940-960 <sup>0</sup> С выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, выдержка при температуре 680-700 <sup>0</sup> С 3-3,5 ч, охлаждение до температуры 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, 40 образцов
2-2. Рис .1, б	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 <sup>0</sup> С 1-1,5 ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, 5 образцов
2-3	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 <sup>0</sup> С 2-2.5-ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, 5 образцов,
	Режимы 2-й промежуточной термообработки
3	Закалка образцов при температуре 940-960 <sup>0</sup> С выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, выдержка при 680-700 <sup>0</sup> С 3-3,5 ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, стабилизирующее старение при 340-360 <sup>0</sup> С (в вакууме) в течение 6-8 ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, 30 образцов
3-2. Рис .1, в	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 <sup>0</sup> С, 3-3,5 ч, охлаждение до температуры 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе. Стабилизирующее старение при температуре 340-360 <sup>0</sup> С (в вакууме) в течение 2-3 ч охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, 5 образцов
3-3	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 <sup>0</sup> С 3-3.5-ч, охлаждение до температуры 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, стабилизирующее старение при 340-360 <sup>0</sup> С в течение 4-5 ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, 5 образцов
	Режимы окончательной термообработки
4	Закалка образцов при температуре 940-960 <sup>0</sup> С выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, выдержка при 680-700 <sup>0</sup> С 3-3,5 ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С на воздухе, стабилизирующее старение при 340-360 <sup>0</sup> С в течение 6-8 ч. отпуск для снятия внутренних напряжений при 160-170 <sup>0</sup> С 6-8 ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, 20 образцов
4-2 Рис .1, г	Закалка та же + стабилизирующее старение при температуре 340-360 <sup>0</sup> С течение 6-8 ч охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе. Отпуск для снятия внутренних напряжений при 160-170 <sup>0</sup> С в течение 2-4 ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, 5 образцов
4-3	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 <sup>0</sup> С 2-2.5-ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С на воздухе, стабилизирующее старение при 340-360 <sup>0</sup> С в течение 4-6 ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе отпуск для снятия внутренних напряжений при 160-170 <sup>0</sup> С в течение 4-6 ч, охлаждение до 150 <sup>0</sup> С, далее на воздухе, 5 образцов

*Примечания:* 1. ТО всех образцов- свидетелей производилась вместе с заготовками для изготовления гирькопа в одной печи. 2. Режимы 2, 2-2, 2-3 и 3,3-2,3.2 и 4,4-2,.4-3 осуществлялись после обработки по оптимальному режиму закалки. 3. Образцы-свидетели служили для изучения структур и физико-механических свойств. 4. В промежутках между режимами термообработки заготовки подвергались технологическим операциям до конечного изделия: механической обработке, контролю качества поверхности, промывке, контролю геометрии, твердости, работоспособности на промышленных стендах

Микроструктура сплава (рис. 1, а) и значения твёрдости (табл. 3) при изменении температуры закалки от 850 до 950<sup>0</sup>С (см. режимы 1, 1-2, 1-3, рис. 2, а, б, в) существенно не изменились, твёрдость повысилась на 12 единиц, тогда как повышение температуры закалки до 1000<sup>0</sup>С привело к огрублению структуры и увеличению твёрдости на 227 ед.; оптимальная температура закалки 950<sup>0</sup>С по режиму 1 обеспечила однородную структуру (рис. 1, а).

Оптимальным временем выдержки при температуре 1-й промежуточной термообработке 680-700<sup>0</sup>С (старение) оказалось 1-1,5 ч (режим 2-2, см. рис. 2, д), который обеспечил благоприятную однородность размеров зёрен по всему шлифу при обеспечении твёрдости

3520 НВ; увеличение времени выдержки при температуре 680-700 °С до 2-2,5 ч, а также до 3,5 ч (режим 2-3, рис. 1, *е* режим 2, рис. 2, *з*) привело к разнотерности микроструктуры (далее режим исключен); увеличение времени 2-й промежуточной термообработки (стабилизирующее старении) от 2-3 до 6-8 при 340-360 °С (режим 3, рис. 2, *ж*) сохраняет все отрицательные признаки предыдущих структур, которые получены при режимах 2, 2-3, (далее режим исключен); увеличение времени старения от 2-3 до 6-8 ч при окончательной термообработке (отпуске) при 160 °С также сохраняет все признаки предыдущих структур, которые получены при режимах 2, 2-3.

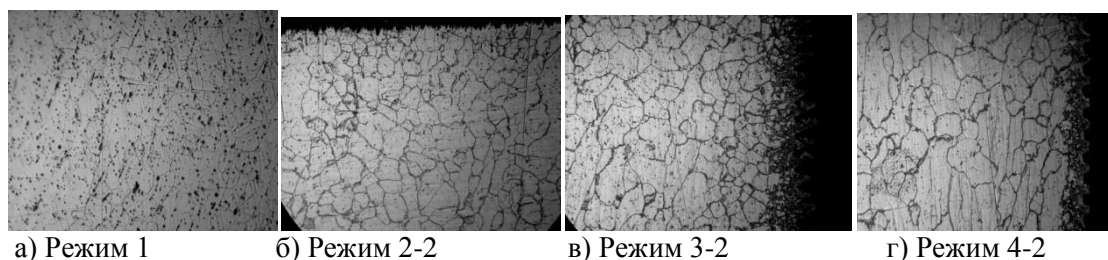


Рис. 1. Микроструктура сплава 44НХТЮ после оптимальных режимов термообработки (x160)

Таблица 3

Значения твердости по Бринеллю НВ, предела микропластичности  $\sigma_0$ , физического предела текучести при сжатии  $\sigma_{Т.сж}$  после различных режимов термообработки сплава 44НХТЮ

Режим ТО	1	1-2	1-3	2	2-2	2-3	3	3-2	3-3	4	4-2	4-3
НВ, МПА	1458	1470	1658	3520	3520 max	3430	3254	3520 max	3430	3430	3620 max	3570
$\sigma_0$ , МПа	50	55	45	355	575	540	520	590	-	575	530	-
$\sigma_{Т.сж}$ ; МПа	220	210	220	880	900	870	870	820	-	920	880	-

Наибольшая твердость (табл. 3) после первичной ТО получена после режима 2-2, который обеспечил наибольшую однородность микроструктуры (зёрненной структуры), она наследуется в режимах 3-2 и 4-2. В дальнейшем структуры после режимов 3-3 и 4-3 были исключены из анализа как неоптимальные.

Диаграммы деформации и характер разрушения сплава (режим 4-2, табл. 2) показали следующее:

а) значения механических свойств составили:  $\delta_p = 0,21$ ,  $\psi_p = 0,17$ ;  $\sigma_T = 695$  МПа,  $\sigma_B = 1150$  МПа, сопротивление разрушению  $S_K = 1375$  МПа, энергоемкость  $W_c = 315$  МДж/м<sup>3</sup> критерии зарождения трещин  $K_{3T} = 0,454$ , распространения трещин  $K_{PT}, \times 10^5 = 10,9$  (МДж/м<sup>3</sup>)<sup>2</sup>;

б) диаграмма деформации при растяжении «усилие – удлинение» состоит из упругой области, области равномерного упрочнения до точки разрыва без сосредоточенного сужения; шейка фактически отсутствует, соблюдается закон постоянства деформируемого объема  $(1 + \delta_p)(1 - \psi_p) = 1$ ;

в) отсутствие шейки указывает на высокое упрочнение сплава, относительно низкую релаксационную способность структуры, при этом фрактография излома в шейке образца имеет квазихрупкий характер, включает участки вязкого (ямочного) и хрупкого излома с наличием микротрещин в межзёрненных участках;

г) уменьшение толщины образцов до толщины перемычек в пределах  $t_0$ , мм = 5,80; 1,0; 0,28; 0,20; 0,12; 0,06 после заключительной термообработки по режиму 4-2 укорачивает диа-

грамму деформации, при этом снижаются: равномерное удлинение  $\delta_r$  до 6% (в 2,5 раза), показатели прочности  $\sigma_T$ ,  $\sigma_b$ ,  $S_K$  – в 5 раз, причем до толщины перемычки 0,2 мм снижение идет медленнее, а затем более интенсивно, МПа; энергоёмкость снизилась в 26 раз, критерий  $K_{3T}$  в 7,5 раз критерия  $K_{рТ}$  в 49 раз; снизился от 10,9 до  $0,22 \cdot 10^5$  (МДж/м<sup>3</sup>)<sup>2</sup>, критерий  $K_{хр}$  в 127 раз;

д) при статических нагрузках значения всех механических характеристик сплава, энергоёмкости и комплексных критериев разрушения остаются достаточно высокими, что обеспечивается значительной долей вязкой составляющей (ямок) в квазихрупком изломе перемычек;

е) при динамическом растяжении при низких температурах работа разрушения сплава в общем снижается не более, чем на 30 % (при 20<sup>0</sup> С составляет 87.9- 93.4 ), при -60<sup>0</sup> С 62-67 кгс м/см<sup>2</sup>), обеспечивая надежную работоспособность сплава, что подтверждено на стендах предприятия при приемочном контроле гироскопа.

При температурах закалки в диапазоне от 850 до 950<sup>0</sup>С (см. режимы 1, 1-2, 1-3) фазовый состав сплава практически не изменился, тогда как при 1000<sup>0</sup>С появляются участки упорядочения, уширение линий рентгенограмм, признаки расслоения карбидных фаз; при углах разориентировки Вульфа-Брегга  $\theta^0 = 0,2; 1,0; ; 0,3; 0,3; 0,1; ; 0,1; 0,3; 0,1$  имеют место фазы: Ni<sub>3</sub>Ti; Fe<sub>2</sub>Ti;  $\gamma$ ; Fe<sub>2</sub>Ti; Ni<sub>3</sub>Ti; Cr<sub>2</sub>Ti;  $\gamma$ ; Cr<sub>2</sub>Ti; Cr<sub>2</sub>Ti; Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>:

а) температура старения 680-700<sup>0</sup>С и при оптимальном времени выдержки 1-1,5 ч, (режим 2-2) получена однородность размеров зёрен по всему сечению шлифа, при максимальном значении твёрдости 3520 НВ; минимальная степень упорядочения наблюдается в режиме 2-2 при выдержке 1,5 ч; в данном режиме обеспечивается наилучшая однородность матричного раствора, происходит уменьшение содержания  $\gamma'$  фазы; увеличение времени выдержки от 2-4 ч (сравни режимы 2, 2-3) привело к увеличению степени упорядочения и появлению интерметаллидных фаз, особенно при выдержке 3-3,5 ч (режим 2);

б) при стабилизирующем старении 340-360<sup>0</sup>С увеличение времени от 2-3 до 6-8 ч привело к возрастанию однородности структуры (особенно при режиме 3-2), при этом плотность частиц второй фазы увеличилась;

в) при стабилизирующем старении 160<sup>0</sup>С увеличение времени от 2-3 до 6-8 ч привело к уширению спектральных линий за счет измельчения блоков, особенно при режиме 4; здесь уже наблюдаются неомогенное состояние твёрдого раствора; при увеличении времени старения от 2-3 до 6-8 ч сплав также сохраняет все положительные признаки структур, полученных ранее при режимах 2, 2-3.

Однородная мелкозернистая структура и границ зёрен, сформировавшихся по всему объёму при оптимальном режиме закалки 950±10<sup>0</sup>С, при последующем упрочняющем старении как бы «декорируется» выделениями частиц упорядочивающей фазы, которые отчетливо видны при микроструктурном и рентгеноструктурном анализе:

а) на ранних стадиях старения по режимам 2-2 и 3-2 появляются: частицы  $\gamma'$  (аустенит, легированный Ni и Ti, имеющий сверхструктуру) – это фаза глобулярной формы, относительно низкой плотности; частицы карбидов Cr<sub>23</sub> C<sub>6</sub>, - выделения по границам зёрен, обеспечивающие дисперсионное твердение; частицы Ni<sub>3</sub>Ti на ранних стадиях старения имеют ГЦК - решетку (упрочняющую), окончательную форму – ГПУ-решетку (разупрочняющую); частицы Fe<sub>2</sub>Ti (кубовидной формы) и Cr<sub>2</sub>Ti также обеспечивают дисперсионное твердение;

б) при старении по режиму 4-2 выделяются частицы  $\eta$ - Ni<sub>3</sub>Ti ( ГПУ –решетка) и кубовидные частицы Cr<sub>2</sub>Ti; при температуре 160-170<sup>0</sup>С интерметаллиды развиваются на наноровне, создавая ячеистую внутри- зёрненную субструктуру;

в) упрочняющее старение при режимах 2-2, 3-2 и стабилизирующее старение по режиму 4-2 и температура отпуска внутренних напряжений 160-170<sup>0</sup>С позволили получить надежную зёрненную структуру. при этом плотность сплава составляла 8440- 8420 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, маршрут режимов ТО сплава в последовательности 2-2, 3-2, 4-2, за счет деформационного и дисперсионного упрочнения обеспечил оптимальные высокие зна-

чения прочности, твердости, энергоемкости и работоспособности структуры. Маршрут положен в основу новой комплексной технологии изготовления гироскопа (рис. 4).

Релаксационных характеристик сплава при микроскопической деформации при нагрузках до предела текучести показали следующее о стабильности структуры:

а) максимальные значения предела микропластичности ( $\sigma_0 = 575$  МПа) получены в сплаве по маршруту термообработки от режима 2-2 до 4-2;

б) результаты измерения упругих модулей акустическими волнами резонансной частоты на специальной установке «Астрон» по соотношению скоростей поперечных и продольных волн показали, что значения упругих модулей сплава при всех режимах изменяются мало.

Значения безразмерного акустического параметр,  $D = C_1/C_2 = C_{\text{поп.}}/C_{\text{прод.}}$ , где  $C_1 = C_{\text{поп.}}$  – скорость сдвиговой (поперечной) волны;  $C_2 = C_{\text{прод.}}$  – скорость продольной волны, служащего практическим критерием контроля стабильности (качества) структуры, показали:

а) изменение показателя  $D$  коррелирует с изменением доли прерывистого превращения в сплаве после различных режимов термообработки;

б) начало распада при старении происходит при режиме 2-2, что обеспечивает значительную долю непрерывного превращения и соответствует уменьшению критерию  $D$ ; - минимум величины  $D$  соответствует оптимальному режиму 3-2; стабилизация критерия  $D$  соответствует оптимальному режиму 4-2;

в) в процессе старения происходит изменение относительного количества  $\gamma'$ -, и -  $\eta$ -фаз, что влияет на модуль упругости сплава;

г) в условиях развития прерывистой реакции старения при скачкообразном изменении состава матрицы наблюдается сильное изменение эливарных свойств сплава; в то же время непрерывный распад, охватывающий весь объем зерна и идущий с плавным изменением состава матричного твердого раствора, обеспечивает наилучший эффект дисперсионного твердения;

д) оптимальное сочетание прочностных и термоупругих свойств эливары достигается путем преимущественного усиления непрерывного выделения и ограничения доли прерывистого распада, что и обеспечивается предложенным маршрутом термообработки.

Анализ фрактографий изломов разорванных цилиндрических образцов №1 - №5 (рис. 2) и натуральных перемычек (рис. 3  $b/t = 30 - 50-100$  показал, что:

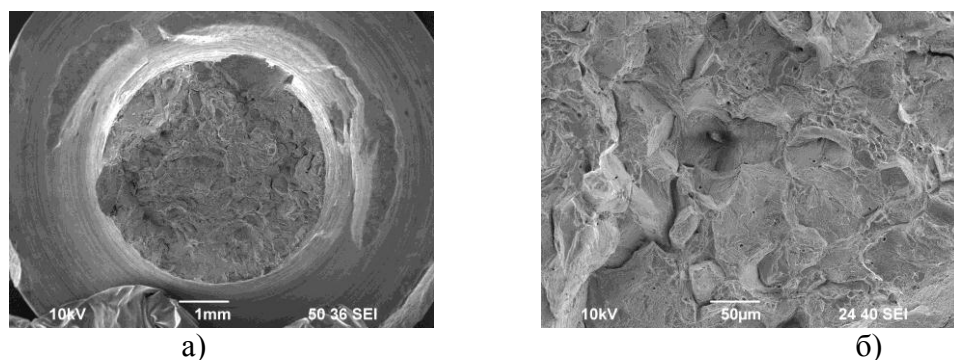
а) излом образцов (рис. 2) имеет характерный квазихрупкий излом, близкий к вязкому (ямочному) разрушению: помимо нормальных напряжений, отвечающих за хрупкое разрушение путем отрыва, присутствуют касательные напряжения, отвечающие за пластическую деформацию скольжением;

б) вид фрактографий изломов перемычек (рис. 3) смешанный, состоит из нескольких участков: плоских, в которых преобладает разрушение от нормальных напряжений, наклонных под углом меньше, либо равном  $45^\circ$ , в которых преобладает разрушение от касательных напряжений; увеличение соотношения ширины и толщины приводит к некоторому увеличению хрупкой составляющей от отрыва;

в) при снижении температуры до  $-65^\circ\text{C}$  и динамической скорости разрыва фрактографии изломов содержат преимущественно вязкие ямки и хрупкие плоские участки, что указывает на сохранение сплавом достаточной пластичности, прочности, энергоемкости и достаточных значений критериев зарождения, распространения трещин, критериев хрупкости, т.е. надежности;

г) фрактографии изломов крестообразных натуральных перемычек при комнатной температуре (рис. 3) показывают участки преимущественно вязкого и частично квазихрупкого излома.

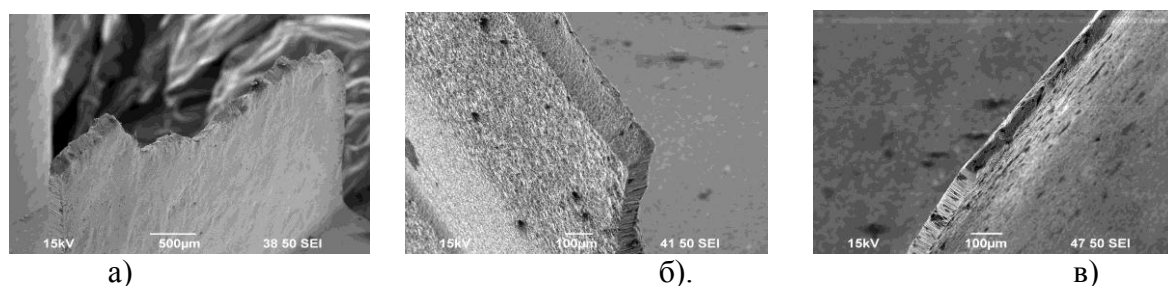
Все приведенные результаты в целом позволили сформировать оптимальный маршрут термообработки с оптимальной структурой и доказать требуемую технологичность сплава.



**Рис. 2. Фрактография изломов сплава после термообработки (режим 4.2):**

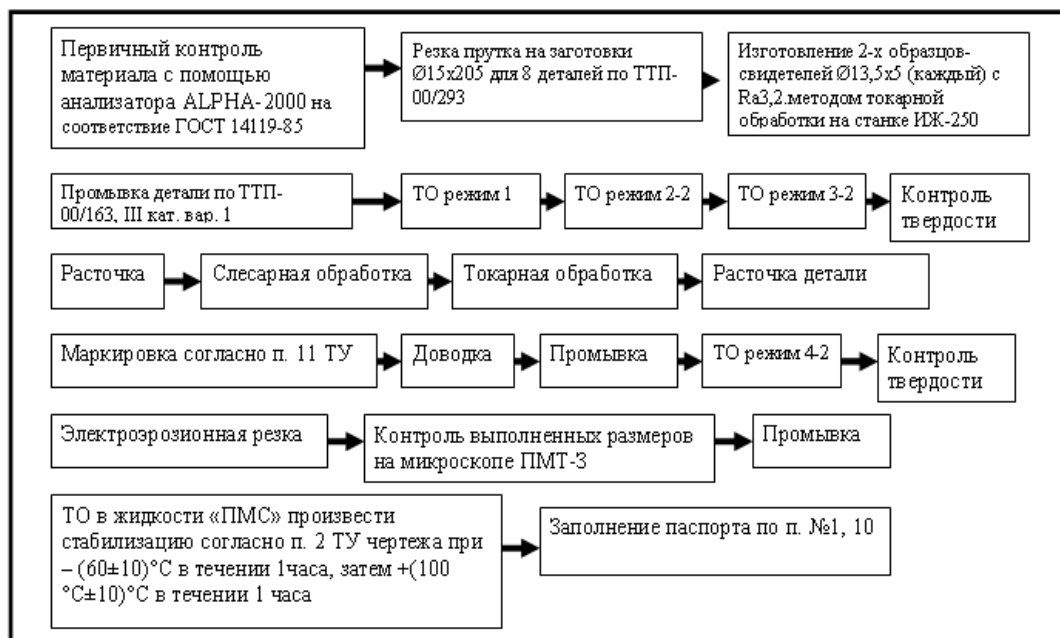
*a* – общий вид излома образца, испытанного на растяжение, (x15);

*б* – центральной части излома образца (x300)



**Рис. 3. Фрактографии изломов натуральных перемычек:**

*a* – обр.№3, (b/t = 30),(x33); *б* – обр. №2, (b/t = 50) , (x100); *в* – обр.№1, (b/t = 100),(x110)



**Рис. 4. Схема комплексной технологии изготовления корпуса гироскопа**

На рис. 4 представлена схема новой комплексной технологии изготовления корпуса нового гироскопа РВГ-1МХ оптимальной конструкции, выполненного из цельной заготовки. Перемычки выполнялись путем образования геометрии окон с учетом допусков на размеры и шероховатость (согласно чертежа) автоматизированной электроэрозионной обработкой на станке –SEIDU M500S при стандартном режиме (температура среды 20<sup>0</sup>С, температура ис-



кры 2000<sup>0</sup>С, время действия 2 мкс, глубина проникновения 6-8 мкм) при настройке станка Die SF CUT за 6 проходов (табл. 4) инструментом (проволочный латунный электрода Ø = 0,25 мм марки MATTEX WIRE Kraft Union) в ванне с деионизированной водой, получаемой при прохождении дистиллированной воды через ионообменную смолу (NPK-ION-EXCHANGE –RESIN).

Отделка поверхности от помутнения проводилась путем опускания изделия в моющую жидкость IONEX на 5 с до восстановления первоначального цвета. Применение оптимального режима ЭЭО устранило конусность упругих элементов, снизило шероховатость поверхностей от 1,6 до 0,4 Ra, обеспечило равенство толщины всех перемычек, в общем сформировать заключительную стадию комплексной технологии изготовления изделия из одной заготовки, Макет конструкции корпуса гироскопа с наличием крестообразных перемычек толщиной 0,065 мм, шириной 0,12 мм в масштабе 5:1 представлен на рис. 5.

В комплексной технологии изготовления операций 5, 6, 7, 15 термической обработки и операций 1, 8, 16,18,19 контроля поверхностей и других параметров обеспечили возможность контрольной проверки гироскопа на эксплуатационных режимах на стендах предприятия в условиях широкополосной случайной вибрации. По итогам контроля в новой конструкции устранены отмеченные недостатки: большая несимметричность шеек относительно оси вращения в РВГ, большие изменения модуля упругости при изменении температур от – 60<sup>0</sup> до + 60<sup>0</sup>С (у бронзы БрБ2 составляют 1,661%, несовершенство технологии химического травления при изготовлении шеек, сборка чувствительного элемента не за один прием; устранены автоматические ограничения угловых перемещений (в упор) при механической установке подвеса РВГ в магнитопровод; полное исключение рихтовки упругих элементов: в 1,5 раза увеличен диаметра вала (до Ø 1,5 мм) и изменен тип резьбы до М 1,4, крепление катушек к двигателю выполнено винтами, что позволяет при съемной катушке более точно выставлять катушку относительно магнита).



**Рис. 5. Макет конструкции корпуса и крестообразных перемычек толщиной 0,065 мм чувствительного упругого элемента гироскопа, выполненные из цельной заготовки (масштаб 5:1)**

### **Выводы**

Решена актуальная научно-техническая задача по разработке комплексной технология изготовления чувствительного элемента в корпусе гироскопа с требуемыми геометрическими размерами и структурой из одной заготовки, основанная на оптимизации режимов предварительной, промежуточной и окончательной термической, пластической, электроэрозивной обработок сплава 44НХТЮ, а также исследований микроструктур, фрактографий изломов, физико-механических свойств (плотности, упругих, релаксационных характери-

стик, шероховатости поверхности перемычек и др.) при рабочих температурах, статических и динамических скоростях эксплуатации.

В результате применения новой технологии в новой конструкции гироскопа:

а) исключены механическая обработка, конусность упругих элементов, несимметричность шеек относительно оси вращения (уменьшена в семь раз) снижена отрицательная роль текстуры, обеспечена низкая степень шероховатости поверхностей;

б) обеспечено снижение изменения модуля упругости при изменении температур от  $-60^{\circ}$  до  $+60^{\circ}$ С до величины 0,140–0,145% (у бронзы БрБ2 изменения составляют 1,661%);

в) за счет выполнения травления шеек за один прием (вместо 2-6) обеспечены требуемая жесткость упругого элемент, частота динамической настройки, сборка чувствительного элемента на вал двигателя за один прием, автоматические ограничения угловых перемещений (в упор) при механической установке подвеса РВГ в магнитопровод;

г) полностью исключена операция рихтовки упругих элементов, что обеспечило повышения точности новой конструкции гироскопа;

д) увеличен диаметр вала в 1,5 раза, что исключило возможность его изгиба, а также изменён тип резьбы, повышающих его надёжность;

е) конструкция позволила при съёмной катушке более точно выставлять катушку относительно магнита и более надёжно крепить ее к двигателю винтами (вместо заливки и клейки).

Ротор и упругий вращающийся карданов подвес, будучи выполнены из одной заготовки, имеют равенство  $TK_{LP} \text{ ротор} = TK_{LP} \text{ диска} = TK_{LP44НХТЮ}$ , поэтому обладают самой высокой стабильностью из всех возможных. Такой динамически настроенный гироскоп (ДНГ) содержит наименьшее число сочленяемых деталей (резьбовых, посадок, сварных, клеевых), вносящих нестабильность и точность количественных характеристик ротора и его упругого подвеса. Разработанная новая технология изготовления гироскопа новой конструкции принята на предприятии для серийного производства гироскопов нового типа. Новизна отдельных решений защищена патентом. Ожидаемый экономический эффект составляет 6,5 млн руб.

#### Библиографический список

1. Харитонов, С.В. Исследование структуры и особенностей фазовых превращений в элинварном сплаве после различных режимов термообработки / В.А. Скуднов [и др.] // Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 112. №3. С. 1–7.
2. Харитонов С.В. Влияние вида закалки на микроструктуру сплава 44НХТЮ/ Н.В. Редькина, С.В. Харитонов, В.А.Скуднов. // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. №7. С. 53–55.
3. Скуднов, В.А. Деформация и разрушение элинварного сплава 44НХТЮ / В.А. Скуднов, С.В., Харитонов, М.К. Чегуров // Деформация и разрушение: сб. материалов IV Междунар. конф., 25-28 окт. 2011. М., ИМЕТ РАН 2011. С. 390.
4. Skudnov, V.A. Structure and Phase Transformations in an Elinvar Alloy after Various Regimes of Heat Treatment / V.A. Skudnov, S.V. Kharitonov, L.A. Osurina // The Physics of Metals and Metallography 2011. №3. P. 283–289.
5. Харитонов, С.В. Влияние закалки и старения на структуру и фазовый состав элинварного сплав 44НХТЮ /С.В.. Харитонов, Л.А.Ошурина, Н.В. Редькина //Р адиопромышленность. 2013. № 1. С. 138–150
6. Харитонов, С.В. Термоциклическая обработка элинварного сплава 44НХТЮ. для гироскопов / С.В. Харитонов, Н.В. Редькина // Радиопромышленность. 2013. № 1. С. 150–157.
7. Харитонов, С.В. Влияние режимов термической обработки на структуру сплава 44НХТЮ, применяемого для изготовления гироскопов / С.В Харитонов, М.К. Чегуров // Радиопромышленность. 2013. № 1. С. 157–162.

8. Харитонов, С.В. Деформация и разрушение элинварного сплава 44НХТЮ/ С.В.Харитонов, В.А.Скуднов, М.К. Чегуров //Вестник научно-технического развития/ 2012. №3. С. 47–53.
9. Пат. № 2492422. Способ изготовления упругого подвеса динамически настраиваемого гироскопа. от 13.09.2013 / С.В. Харитонов, В.Т. Лещев, В.А. Скуднов, В.В. Палавин., М.К. Чегуров.

*Дата поступления  
в редакцию 29.05.2014*

**V.A. Skudnov<sup>1</sup>, S.V. Kharitonov<sup>2</sup>**

**STRUCTURE AND PHYSICS – MECHANICAL PROPERTIES OF 44HXTЮ ELINVAR ALLOY AND TECHNIQUES OF MANUFACTURING THE ELASTIC ELEMENT OF ONE-PIECE GYROSCOP (OF PБГ-MX - AND PБГ-7-TYPE ) FROM ONE BLANK**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
JSC "Arzamas research and production enterprise " TEMP-AVIA " <sup>2</sup>

This paper contains the results of examining the Structure ( phase composition, grain size, Physics – Mechanical Properties), modules of elasticity, density, strength and plasticity values of 44HXTЮ Elinvar alloy after 12 modes of integral heat treatment (hardening, ageing- main and stabilizing to relieve the stresses), electroerosive treatment of the sensitive element in the gyroscope one-piece body made from one blank. These have been obtained by microstructural, electronic microscope, x-ray-structural, ultrasound resonance, mechanical and other testing methods under temperature from +100 to -60<sup>0</sup>C on prototypes as well as on manufactured elastic elements which have proved the required serviceability of the product at the industrial test stands of the enterprise.

*Key words:* 44HXTЮ alloy, heat treatment, structure, mechanical properties, one-piece body, technique, gyroscope.