

УДК 620.18

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ УЗЛОВ ГИРОПРИБОРОВ

С.А. Яковлева, В.И. Гаврюсев, А.Г. Щербак

Представлена структурная схема изготовления прецизионных узлов, обеспечивающая стабильность их размеров и формы, рассматривающая три последовательных взаимосвязанных уровня: материал, деталь, узел. Для каждого уровня выявлены основные причины нестабильности, сформулированы возможные критерии оценки размерной стабильности и предложены технологические методы и средства повышения и сохранения точности изделий.

**Ключевые слова:** размерная стабильность, прецизионный предел упругости, условные пределы релаксации и ползучести, прецизионные детали и узлы, стабилизация размеров.

### Введение

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разрабатывает и производит навигационные приборы и комплексы высокой степени точности и надежности. К деталям и узлам гиросприборов предъявляются жесткие требования по их геометрической точности: отклонение линейных размеров по 5–6 квалитетам и с более высокой точностью, отклонение взаимного расположения и формы поверхностей – доли угловой секунды или десятые–сотые доли микрометра [1]. При этом требования к постоянству размеров и формы еще более высоки и должны обеспечиваться в условиях изготовления, хранения и длительной эксплуатации при постоянной и переменной температурах, так как нестабильность геометрии прецизионных деталей и узлов прямо влияет на погрешность прибора.

Практика показывает, что при изготовлении высокоточных деталей и узлов возникают трудности в получении геометрических размеров, формы и расположения поверхностей, а также в вопросе достоверности и точности получаемой при измерениях информации, так как колебания температуры и температурные градиенты приводят к изменениям размеров и формы. Кроме того, применяемые в высокоточных приборах материалы могут иметь нестабильность структурных характеристик, что не позволяет в полной мере обеспечить требования по качеству и точности изготавливаемых деталей и узлов. Все это приводит к тому, что обеспечение указанных требований прецизионных сборок носит проблемный характер, поскольку требует учета целого ряда факторов различной значимости, связи между которыми обладают неопределенностью. Поэтому одним из наиболее важных технологических аспектов процесса изготовления прецизионных узлов и конструкций является обеспечение стабильности размеров на уровне, который может достигать сотых долей микрометра. При этом геометрические параметры изделия не должны превышать допустимый уровень в условиях изготовления, хранения и длительной эксплуатации.

Актуальность данной работы обусловлена, помимо вышеуказанного, отсутствием нормативной документации по стабилизации сборок и необходимостью комплексной оценки всех этапов изготовления узла и учета влияния целого ряда взаимообусловленных факторов, связанных с последовательными стадиями процесса изготовления изделия.

### Постановка задачи

Цель работы заключается в изложении основных причин, влияющих на геометрическую точность изделия и ее стабильность во времени и сложных условиях эксплуатации, и определении системных комплексных подходов, позволяющих обеспечить управляемый характер процесса формообразования прецизионных деталей и узлов. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач.

- выявление причин нестабильности геометрической точности прецизионных узлов;
- определение критериев оценки размерной стабильности материалов, деталей, узлов;
- разработка направлений повышения размерной стабильности прецизионных деталей и узлов.

### Характеристика технической ситуации

В настоящее время известны преимущественно локальные технические решения по обеспечению вышеуказанной точности и практически отсутствуют системные подходы к решению проблемы обеспечения размерной стабильности прецизионных узлов из целого ряда перспективных конструкционных материалов. В традиционных методах расчета конструкций с назначением запаса прочности и технического предела текучести используется макроскопический предел текучести  $\sigma_{0,2}$  металлов и сплавов,

который характеризует постоянство свойств материала в макрообъемах. Однако для сохранения точностей прецизионных деталей необходимо обеспечивать как можно более высокие пределы напряжений, при которых начинаются движения линейных дефектов кристаллической решетки – дислокаций – и стабильность фазового состояния, т.е. постоянство характеристик в микрообъемах. В то же время для достижения только высоких прочностных свойств эти факторы не обязательны.

Действующие сегодня нормативные материалы на стабилизацию размеров термической обработкой, такие как [2, 3], предусматривают в качестве оценки размерной стабильности материала условный предел упругости  $\sigma_{0,001}$  при растяжении и условный предел релаксации при изгибе  $\sigma_r 0,001/500-3500$ . Указанные стандарты имеют определенные ограничения [4]:

- они предлагают только термические методы стабилизации геометрической точности;
- в них не включен ряд новых материалов, применяемых в навигационной технике;
- эффективность рекомендуемых режимов термостабилизации, как показывает практика, не всегда достаточна;
- в них не содержится сведений по стабилизации и методам оценки стабильности сборок, в том числе сварных;
- используемая характеристика размерной стабильности материала – условный предел упругости  $\sigma_{0,001}$  – на порядок больше по допустимой остаточной деформации, чем прецизионный предел упругости.

В настоящее время отсутствует комплексная характеристика размерной стабильности конструкций, и хотя [2] предусматривает подразделение деталей на категории с учетом заданной точности, их формы и жесткости, но стандарт не учитывает всех отрицательных факторов, влияющих на точность реальной детали, а стабилизацию сборочных единиц практически не охватывает. Поэтому для достоверной оценки размерной стабильности каждой ответственной детали и сборки необходима разработка и практическая реализация оригинальной методики экспериментальной проверки.

#### **Предлагаемый комплексный подход**

Для обеспечения стабильности геометрической точности прецизионного узла предлагается анализировать, оценивать и обеспечивать стабильность геометрической точности на последовательных взаимосвязанных уровнях: материал, деталь, узел.

На каждом уровне выявляются причины нестабильности, возможные критерии оценки их влияния и предполагаемые технологические методы и средства повышения и сохранения точности узла, что наглядно представлено в таблице в виде структурной схемы.

Уровень	Причины нестабильности	Критерии оценки	Методы обеспечения
Материал	Фазовая нестабильность	Значения показателей сопротивления микропластическим деформациям (СМПД)	Термическая обработка: закалка, старение, отжиг и др.
	Структурная нестабильность		
	Анизотропия (текстура)	Изотропность физико-механических характеристик	
Деталь	Критические значения внутренних напряжений	$\sigma_{max} < \sigma_{0,0001}$ или $\sigma_{max} < \sigma_{r 0,001}$	Структура технологического процесса (ТП) изготовления
	Распределение внутренних напряжений (наличие концентраторов напряжений)	Осесимметричность поля внутренних напряжений	Корректировка конфигурации
Узел	Остаточные напряжения в соединениях	$\sum \sigma_{соед} < \sigma_{0,0001}$	Корректировка конфигурации и характера сопряжения Структура сборочного ТП
	Колебания температуры и температурные градиенты	Согласованность температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов входящих деталей	Применение материалов с близкими ТКЛР
	Размерная нестабильность составляющих звеньев	Размерная нестабильность замыкающего звена	Расчетно-экспериментальный метод оценки нестабильности замыкающего звена

Таблица. Структурная схема обеспечения стабильности геометрической точности прецизионных узлов

### Причины размерной нестабильности на уровне материала

Микроструктурные изменения материала включают в себя изменения концентрации вакансий и междоузельных атомов, атомное упорядочение, дисперсионное выделение и растворение вторичных фаз, фазовые превращения с изменением типа кристаллической решетки [4]. При температуре, близкой к комнатной, особенно велика роль точечных дефектов. К этим дефектам в первую очередь относятся вакансии и междоузельные атомы, образующиеся при закалке, пластическом деформировании, в том числе при механической обработке, и при других технологических воздействиях. Из-за высокой подвижности точечных дефектов при низких температурах происходит их активное перемещение к стокам, в качестве которых выступают поверхности деталей, границы зерен, дислокации и другие элементы структуры. Выход вакансий на стоки приводит к изменению геометрии образца.

Для оценки размерной стабильности материала используют характеристики способности материала сопротивляться микропластическим деформациям при кратковременном и длительном нагружении [5, 6]. При кратковременном нагружении стабильность характеризуется прецизионным пределом упругости (ППУ)  $\sigma_{0,0001}$  или  $\sigma_{0,0002}$ . Этот показатель определяется по величине напряжения, при котором после разгрузки образца возникает остаточная деформация  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  в относительных единицах или  $(1-2) \cdot 10^{-4}$  в процентах. ППУ является характеристикой сопротивления начальным стадиям пластической деформации при кратковременном нагружении и значительно меньше макроскопического предела текучести  $\sigma_{0,2}$ .

Однако результаты испытаний широкого круга конструкционных материалов показывают, что ППУ не является исчерпывающей характеристикой размерной стабильности материала, так как свидетельствует о способности сохранения постоянства размеров лишь на период изготовления, сборки и регулировки изделий, который в производственных условиях составляет несколько сотен часов [5].

Более полной характеристикой сопротивления материала микропластическим деформациям во времени является условный предел релаксации (УПР), определяемый при длительном нагружении. Как известно, кривая релаксации напряжений (рисунок) характеризуется наличием двух участков – интенсивной релаксации в начальный период испытаний с последующей замедленной скоростью процесса во второй стадии (кривая 1) или полным его прекращением (кривая 2).

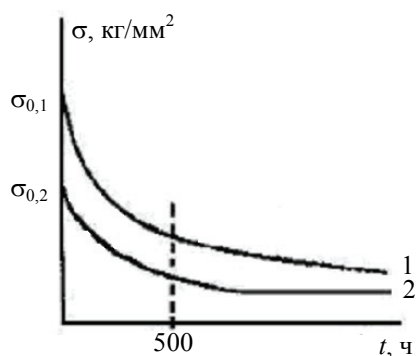


Рисунок. Кривые интенсивной релаксации напряжений в начальный период испытаний: 1 – с замедленной скоростью процесса; 2 – полным его прекращением

Условный предел релаксации  $\sigma_{r,0,001/500-3500}$  или условный предел ползучести (УПП)  $\sigma_{0,001/500-3500}$  – это напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,001% в условиях релаксации или ползучести, соответственно, в интервале времени 500–3500 ч.

### Причины размерной нестабильности на уровне детали

Высокое СМПД и структурная устойчивость материалов являются необходимым, но не достаточным условием создания высокостабильных изделий. Прецизионная деталь должна иметь размеры и форму, обеспечивающие при воздействии внешних нагрузок осесимметричную эпюру напряжений, не превосходящих ППУ или УПР [4].

Поэтому на данном этапе необходимо проведение анализа конструкции детали с рассмотрением распределения поля внутренних напряжений, которые не должны превышать ППУ или УПР (УПП), особенно в местах концентрации напряжений (выточки, отверстия, подрезы и т.п.).

Кроме того, за счет технически рационального построения технологического процесса изготовления конкретной детали необходимо снижать уровень остаточных напряжений в готовой детали, внесен-

ных обработкой в процессе ее формообразования, до определенных значений, соответствующих выбранным критериям оценки стабильности материала детали.

### **Причины размерной нестабильности на уровне узла**

В реальных узлах могут действовать такие дополнительные отрицательные факторы, как пониженная жесткость конструкции, высоконапряженные соединения, разнородность материалов в сборочных узлах и др. Поэтому необходимо проводить анализ конструкции узла, характера сопряжения с последующими необходимыми корректировками; с учетом которых и разрабатывать технологический процесс сборки, предусматривая соответствующие обработки для снятия внутренних напряжений, внесенных операциями сборки узла; а также применять материалы деталей узла с согласованными или близкими ТКЛР.

Представляя размерную нестабильность узла в виде отдельных составляющих, целесообразно для ее анализа использовать расчетно-экспериментальный метод поэтапной оценки [1]. Метод предполагает последовательный анализ стабильности составляющих звеньев, т.е. только тех элементов конструкции, которые входят в размерную цепь с замыкающим звеном, определяющим точность узла. Понижая размерную нестабильность определенных составляющих звеньев, можно повысить размерную стабильность замыкающего звена, а значит, и всего узла.

### **Заключение**

Обоснована актуальность и важность комплексного подхода к решению проблемы повышения уровня размерной стабильности прецизионных узлов гиросприборов.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность изделий – структурно-фазовая нестабильность, остаточные напряжения, температурные поля, и физические механизмы процессов, определяющих их размерную стабильность и связанных со свойствами исходных материалов, конфигурацией деталей и особенностями процесса сборки.

Предложена общая структурная схема обеспечения стабильности размеров и формы прецизионных узлов, рассматривающая три последовательных взаимосвязанных уровня: материал, деталь, узел. Для каждого уровня сформулированы возможные критерии оценки размерной стабильности – прецизионный предел упругости, условный предел релаксации или ползучести, равномерность поля внутренних напряжений, согласованность температурных коэффициентов линейного расширения материалов и др.

Определены направления дальнейших исследований, которые позволят повысить точность и размерную стабильность реальных узлов гиросприборов, что, в свою очередь, улучшит их функциональные характеристики.

### **Литература**

1. Гаврюшев В.И. Метод оценки размерной нестабильности замыкающего звена гироскопических сборок // Гироскопия и навигация. – 1993. – № 1. – С. 18–25.
2. ГОСТ 17535-77. Детали приборов высокоточные металлические. Стабилизация размеров термической обработкой. Типовые технологические процессы. – Введ. 15.02.78. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 47 с.
3. ОСТ4 ГО.054.103. Детали приборов высокоточные металлические. Стабилизация размеров термической обработкой. Типовые технологические процессы. – Введ. 01.07.75. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 74 с.
4. Гаврюшев В.И. Геометрическая стабильность металлических приборных конструкций и технологические методы ее повышения. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1981. – 146 с.
5. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
6. Гаврюшев В.И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. – 113 с.

**Яковлева Светлана Анатольевна** – ОАО Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, аспирант, yorkunoi@gmail.com  
**Гаврюшев Владислав Иванович** – ОАО Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, ведущий специалист, кандидат технических наук, доцент  
**Щербак Александр Григорьевич** – ОАО Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, начальник сектора, доктор технических наук, a\_sch@gtn.ru