

С. А. ЯКОВЛЕВА, О. С. ЮЛЬМЕТОВА

РАЗМЕРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Рассмотрены причины возникновения размерной нестабильности материалов и конструкций приборов, а также физические механизмы ее проявления. Представлен расчетно-экспериментальный метод оценки размерной нестабильности сборочных конструкций и отмечена актуальность его применения при создании высокоточных приборов.

Ключевые слова: геометрическая стабильность, сопротивление микропластическим деформациям, микроползучесть.

Способность металлических материалов и изделий к самопроизвольному изменению формы и размеров с течением времени является значительным препятствием на пути обеспечения непрерывно возрастающих требований к точности и надежности приборов. Так, к деталям и узлам приборов навигационных комплексов предъявляются чрезвычайно 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 при длительной эксплуатации в условиях постоянной и переменной температуры, так как нестабильность геометрии высокоточных деталей и узлов непосредственно влияет на погрешность прибора.

Обеспечение указанных требований является достаточно сложной задачей, решение которой связано с необходимостью использования металлических материалов с высоким постоянством их качества, необходимостью применения специальных методов и технологических процессов стабилизирующей обработки при изготовлении изделий [2].

Самопроизвольное изменение размеров металлических изделий является следствием в основном трех факторов [3]:

- 1) нестабильности фазового и структурного состояния материала;
- 2) релаксации остаточных внутренних напряжений, возникающих в деталях в процессе различных технологических операций горячей и холодной обработки, а также при механо-сборочных операциях и в процессе длительного хранения;
- 3) микроползучести под действием внешних нагрузок.

Влияние любого фактора (факторов) может оказаться преобладающим в зависимости от конкретных условий, например, материала, его структурного состояния и рабочих напряжений. Особенно интенсивно процессы микроползучести и релаксации развиваются в сплавах с метастабильным фазовым и структурным состоянием. В условиях эксплуатации высокоточных приборов наблюдается процесс медленного и непрерывного нарастания пластической деформации при снижающихся во времени внутренних напряжениях в материале, значительно меньших предела текучести. Чем больше сопротивление материала микропластическим деформациям во времени, тем выше его размерная стабильность в условиях эксплуатации и длительного хранения. Поэтому основной функцией применяемых при изготовлении деталей приборов стабилизирующих обработок является повышение сопротивления материала изделий микропластическим деформациям.

Показатели сопротивления микропластическим деформациям металлов и сплавов не коррелируют с условным пределом текучести, который используется в традиционных методах расчета конструкций с назначением запаса прочности. Для высокого сопротивления

микропластическим деформациям при кратковременном и длительном нагружении необходимо обеспечить как можно более высокие напряжения начала движений дислокаций и стабильность фазового состояния, в то время как для достижения только высоких прочностных свойств эти факторы не существенны.

В основу методов повышения сопротивления металлов и сплавов микропластическим деформациям положены принципы создания препятствий движению дислокаций, обеспечения стабильности структурного состояния в условиях эксплуатации и понижения остаточных внутренних напряжений. Но максимально возможное снижение остаточных внутренних напряжений за счет термической обработки не решает проблемы обеспечения постоянства размеров изделий во времени, поскольку зачастую приводит к снижению сопротивления микропластическим деформациям материала.

Действующие нормативные материалы, такие как ГОСТ 17537-75 и ОСТ4.ГО 054103 на стабилизацию размеров термической обработкой, имеют определенные недостатки [3]:

- представлены только термические методы стабилизации;
- отсутствует ряд новых материалов, применяемых в навигационной технике;
- эффективность представленных режимов ограничена (как показывает практика);
- отсутствуют сведения о стабилизации сварных узлов и методах оценки стабильности сборок.

Нахождение оптимального решения практических задач выбора, разработки и применения материалов и технологий для высокоточных изделий возможно в результате дальнейших обстоятельных исследований зависимости характеристик размерной стабильности от строения малоизученных металлов и сплавов, а также разработки методов оценки стабильности высокоточных деталей и сборок.

Для оценки размерной стабильности сложных гироскопических сборок был предложен метод, основанный на расчетно-экспериментальном подходе [1].

Размерную нестабильность сборочной конструкции ε можно представить как сумму нестабильностей ненагруженных (см. далее формулу (1)) и нагруженных (4) при сборке и эксплуатации деталей, нестабильностей ненагруженных неразъемных (2) и разъемных (3) соединений узлов, а также нестабильностей неразъемных соединений, нагруженных при сборке и эксплуатации (5).

Нестабильность ненагруженных деталей складывается из структурной нестабильности материала и нестабильности, вызванной релаксацией остаточных напряжений, возникающих в результате различных технологических воздействий:

$$\varepsilon_{\text{д}} = \sum_{i=1}^m (\varepsilon_{\text{с}i} + \varepsilon_{\text{р}i}), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{с}}$ — структурная нестабильность; $\varepsilon_{\text{р}}$ — нестабильность, вызванная релаксацией остаточных напряжений; m — количество деталей в сборке ($i = \overline{1, m}$).

Нестабильность ненагруженных неразъемных соединений складывается из структурной нестабильности материалов швов (сварных, паяных, клееных) и деформации, вызванной релаксацией остаточных напряжений:

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \sum_{j=1}^n (\varepsilon_{\text{с}j} + \varepsilon_{\text{р}j}), \quad (2)$$

где n — число неразъемных соединений ($j = \overline{1, n}$).

Нестабильность ненагруженных разъемных соединений определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{к}} = \sum_{j=1}^{m-n-1} \varepsilon_j, \quad (3)$$

где $m-n-1$ — число разъемных соединений ($j=\overline{1, m-n-1}$), ε_j — нестабильность, вызванная деформацией в контактных поверхностях соединения.

Деформации в контакте зависят от шероховатости и загрязнений поверхности. При небольшой шероховатости, хорошей очистке деталей и чистовых условиях сборки такие деформации даже в течение длительного времени не превысят сотых долей микрометра на одну пару контактных поверхностей, и часто ими можно пренебречь.

Нестабильность нагруженных в сборке деталей (4) и швов (5), подвергнутых воздействию внутренних напряжений от сборочного крепежа и посадок с натягом, а также внешних эксплуатационных (транспортных) напряжений, можно определить по следующим формулам:

$$\varepsilon_{нд} = \sum_{i=1}^{m_p} \varepsilon_{pi} + \sum_{l=1}^{m_{\Pi}} \varepsilon_{\Pi l}, \quad (4)$$

где m_p — количество деталей, подвергнутых релаксации внутренних напряжений ($i=\overline{1, m_p}$); m_{Π} — количество деталей, подвергнутых микроползучести под действием внешних напряжений ($l=\overline{1, m_{\Pi}}$); ε_{Π} — нестабильность, вызванная микроползучестью детали:

$$\varepsilon_{нш} = \sum_{j=1}^{n_p} \varepsilon_{pj} + \sum_{l=1}^{n_{\Pi}} \varepsilon_{\Pi l}, \quad (5)$$

где n_p — количество швов, подвергнутых релаксации ($j=\overline{1, n_p}$); n_{Π} — количество швов, подвергнутых микроползучести ($l=\overline{1, n_{\Pi}}$).

Представление нестабильности в виде отдельных составляющих позволяет применять экспериментально-расчетный метод ее поэтапной оценки для сложных высокоточных приборныхборок. Метод предполагает знание целого ряда механических характеристик входящих в изделие материалов и предусматривает поэтапный анализ стабильности с движением от простого объекта к более сложному: материалы, соединения, отдельные детали, узлы, прибор в целом. При этом учитываются только те элементы конструкции, которые входят в размерную цепь с замыкающим звеном, определяющим точность прибора.

Расчеты высокостабильных конструкций традиционными методами сопротивления материалов и теории упругости неэффективны, так как размерная нестабильность проявляется даже в отсутствие внешних механических воздействий и увеличивается при их наличии, а также под воздействием физических полей. Поэтому анализ размерной нестабильности конструкций включает экспериментальное определение характеристик нестабильности с применением специальных моделей, дополняемое расчетами. На каждом из этапов методика предусматривает решение специфических задач, но и содержит некоторые общие требования. Так, общим является требование иметь на образцах, моделях и деталях базовые измерительные поверхности, максимально приближать форму моделей и технологию их изготовления к реальной конструкции, заканчивать каждый этап при необходимости корректировкой конструкции и технологии, обеспечивая наивысшую размерную стабильность исследуемого объекта.

Данный метод был апробирован [1] при оценке стабильности малогабаритного гироскопа с магнитным подвесом, в котором замыкающим звеном, определяющим точность прибора, является величина отклонения от перпендикуляра оси датчика момента к базовой посадочной поверхности наружного корпуса прибора. В результате были заменены материалы некоторых деталей, выбраны оптимальные виды стабилизирующей обработки и технологические схемы изготовления деталей и узлов, что значительно повысило размерную

стабильность конструкции, таким образом долговременная нестабильность перпендикулярности оси датчика к базовой поверхности, изготовленного с применением предложенной методики, может принимать значения в пределах 1,2—15”.

В дальнейшем планируется применить данный расчетно-экспериментальный метод оценки размерной нестабильности к высокоточным узлам гироскопических приборов, разрабатываемым в ЦНИИ „Электроприбор“.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-08-00158а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаврюсов В. И.* Метод оценки размерной нестабильности замыкающего звена гироскопических сборок // Гироскопия и навигация. 1993. № 1. С. 18—25.
2. *Хенкин М. Л., Локшин И. Х.* Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1974. 256 с.
3. *Гаврюсов В. И.* Размерная стабильность материалов и элементов конструкций. Л.: ЦНИИ „Румб“, 1990. 113 с.
4. *Гаврюсов В. И.* Геометрическая стабильность металлических приборных конструкций и технологические методы ее повышения. Л.: ЦНИИ „Румб“, 1981. 146 с.

Сведения об авторах

- Светлана Анатольевна Яковлева* — ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; инженер-технолог 1-й категории; E-mail: yorokunoi@gmail.com
- Ольга Сергеевна Юльметова* — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; ассистент; E-mail: www.ralli@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
14.12.09 г.