

3) Определение координат при скоростях вращения от 15 до 30°/с

Итог: на данный момент мы имеем высокоточные ЗД, не нуждающиеся в других датчиках ориентирования, способные работать на любых орбитах, но имеющие высокую цену, большую чувствительность к помехам и зависимость от скорости вращения КА.

Библиографический список

1. Терехов Филипп. Как не заблудиться в космосе. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/post/365759/> (дата обращения 29.10.2018)

2. Дятлов С. А., Бессонов Р. В. Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов // В сб. трудов ВНТК «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». Таруса: ИКИ РАН, 2008. С. 11 – 32.

3. Абубекеров М. К., Прохоров М. Е., Захаров А. И., Стекольников О. Ю. Патент РФ №2577558, 2016.

4. Прохоров М. Е. Современные датчики звездной ориентации. Е.: Изд-во Уральского университета, 2009.

УДК 620.1.08

ОЦЕНКА И СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ VT23

М. С. Калугина, Г. А. Воробьева, З. Н. Расулов, Е. Ю. Ремшев

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Известно, что холоднотянутая проволока, листовый прокат поступает к производителям пружин в крайне напряженном состоянии. Установлено, что абсолютные значения остаточных напряжений первого рода могут быть соизмеримы с величинами пределов текучести. К такому же выводу можно прийти и на основании фактов возникновения значительных остаточных деформаций или осадок пружин при относительно малых расчетных напряжениях. Несмотря на неоспоримую связь служебных показателей изделий из проволоки с их исходными напряженными состояниями, последнее, тем не менее, не только не регламентируются, но и не контролируются ни на одном из этапов производства. Одному из источников возникновения остаточных напряжений, а именно операции заневоливания пружин, было уделено не малое внимание. Названному же условию удовлетворяют только пружины из закаливаемых марок сталей, у которых, благодаря нагреву при высоких температурах после операции волочения и навивки, остаточные напряжения от предшествующих операций устраняются. Что же касается пружин из нагартованной проволоки, то на них нельзя распространять теории заневоливания без учета напряжений от операций предшествующей обработки [1 – 3].

На основании ряда соображений в принципе можно было предлагать, что угловые искажения в расположениях витков при операциях нагрева связаны с фазовыми или диффузионными процессами, сопровождающимися неравными изменениями объемов в разных сечениях витка. Так, например, если бы существовало какое-либо внутреннее превращение, при котором увеличение объема в растянутых волокнах витка совершалось в большей степени, чем в сжатых, то было бы вполне возможным объяснить дополнительный изгиб витков за счет указанных различий. Однако, подобные процессы маловероятны, учитывая, во-первых, что закручивание в заметной степени протекает при низкой температуре (150 °С) и, во-вторых, как показали предварительные опыты автора [1], закручивание совершается за очень короткий промежуток времени. Полученные результаты косвенно указывали на связь закручивания с остаточными

напряжениями от навивки и, следовательно, дальнейшая задача сводилась к экспериментальному изучению специфики распределения остаточных напряжений первого рода. Различие пределов текучести при растяжении, сжатии лежит в основе, как необычного распределения остаточных напряжений, так и в основе необычных изменений форм изделий из нагартованной проволоки в процессе нагрева. Следует обратить внимание на ряд обстоятельств, имеющих, по-видимому, прямое отношение к проблеме прочности. В данном случае речь идет о том, что при расчетах на прочность и в том числе при расчетах на повышения несущей способности пружин методом заневоливания [1 – 3], напряженность оценивается по состоянию в поверхностных слоях. При этом считается, что поскольку прилагаемые упругие напряжения от нагрузки в процессе работы распределяются по линейному закону и они максимальны на поверхности, то ответственными за устойчивость являются наружные слои металла.

Одной из важнейших задач исследования прочностных свойств металлов и сплавов является измерение распределения механических (в том числе технологических остаточных) напряжений σ по толщине h поверхностного слоя изделия. Классическим методом изучения эпюр σ (h) признан разрушающий метод на образцах, вырезаемых из исследуемого изделия, подвергнутого различным физико-механическим воздействиям, а по измеренной деформации образцов при удалении напряженных слоев судят о механических напряжениях в них. Одним из неразрушающих способов определения механических напряжений в изделиях из металлов и сплавов является электромагнитный контактный способ, основанный на использовании фундаментальной связи между электрическими и механическими свойствами металлических проводников и явления скин-эффекта в них. Известна связь величины удельной электрической проводимости с величиной механических напряжений, которым он (металл) подвергался. В электронной теории металлов [4] показано, что удельная электрическая проводимость γ определяется формулой:

$$\gamma = \frac{e^2 E n_0}{m k T V_T N_0 \pi} \cdot d, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, m – масса покоя электрона, n_0 – число электронов проводимости в единице объема, E – модуль упругости, k (в данном выражении) – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, V_T – скорость теплового движения электронов, N_0 – число атомов в единице объема, d – период кристаллической решетки. Известна связь удельной электрической проводимости γ с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 1/\gamma$.

При отсутствии механических напряжений металл имеет номинальное значение периода решетки d_0 и соответствующее номинальное значение удельной электрической проводимости γ_0 . Под действием механических напряжений $\Delta\sigma$ имеет место изменение периода решетки металла Δd . В зоне упругих деформаций это изменение можно считать пропорциональным механическому напряжению и, в соответствии с (1), изменения электропроводности $\Delta\gamma$ также пропорциональны механическим напряжениям $\Delta\sigma$:

$$\Delta\gamma = P_\sigma \cdot \Delta\sigma, \quad (2)$$

где P_σ – экспериментально определяемый коэффициент, характеризующий свойства материала.

Таким образом, измеряя электрические свойства проводящих изделий, можно определять механические напряжения в них. При этом необходимо измерять распределение электрических параметров и механических напряжений по глубине изделий.

Для измерения распределения удельного сопротивления по глубине используем известное явление скин-эффекта [5], при котором высокочастотные токи сосредотачиваются у той поверхности проводника, которая является ближайшей к источникам поля, вызывающим появление токов. На основании известного (там же) решения системы уравнений Максвелла для проводящего полупространства плотность тока i в таком проводнике определяется выражениями

$$i/i_0 = e^{-(1+j)\frac{x}{h}}, \quad (3)$$

$$h = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}}, \quad (4)$$

где i_0 – плотность тока на поверхности полупространства (при $x = 0$), f – частота тока, μ – магнитная проницаемость материала, γ – удельная электропроводность материала.

В соответствии с выражением (3) величина плотности тока экспоненциально уменьшается с увеличением глубины x , а h / формула (4) / представляет значение глубины, на которой плотность тока падает в «е» раз по сравнению со значением i_0 на поверхности. По определению h – глубина проникновения поля (тока) в проводник, т.е. толщина поверхностного слоя, в котором распространяется основная часть поля (тока).

Использование явления скин-эффекта позволяет послойно исследовать проводящее изделие путем подачи в него электромагнитного поля различной частоты и измерения сигнала-отклика, параметры которого связаны с изменением напряженного состояния изделия. В соответствии с выражением (4) уменьшение частоты посылаемого в изделие переменного тока позволяет увеличивать толщину исследуемого слоя. Выбором полосы рабочих частот можно обеспечить требуемый диапазон исследования по глубине изделия.

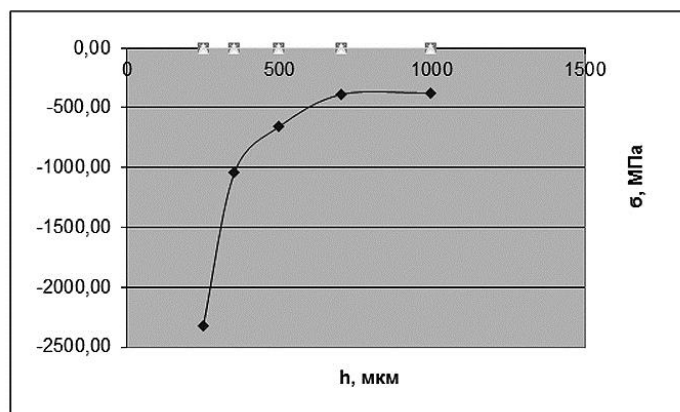
Исследовали образцы из сплава ВТ23 устройством, в основу которого положен принцип скин-эффекта (Резикон). Образцы титанового сплава, используемого в пружинном производстве подвергали обработке: азотермоакустической и фторорганической наноконпазией [6 – 8]. После чего производили измерения на приборе «Резикон» (ЦКП «Центр исследования материалов» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова).

Таблица 1
Результаты измерения остаточных напряжений на приборе «Резикон»

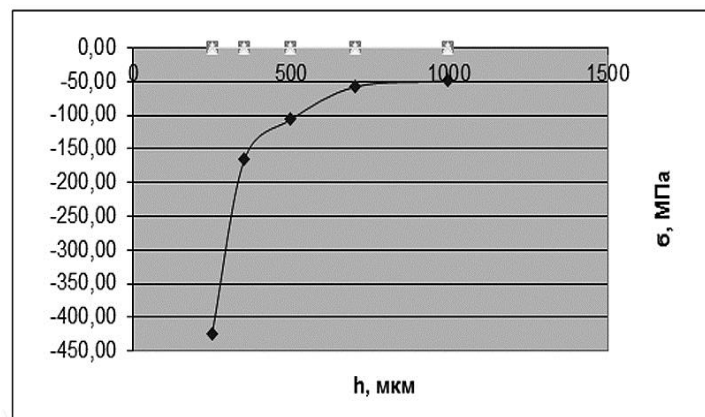
Тип образца	Глубина измерения остаточных напряжений, мкм	Величина остаточных напряжений, МПа
ВТ23 исходное состояние №1	249	-2328
	352	-1040
	497	-657
	703	-386
	994	-376
ВТ23 закалка	249	-1977
	352	-951
	497	-584
	703	-346
	994	-345
ВТ23 комбинированная обработка АТАО образец №1	249	-424
	352	-164
	497	-106
	703	-57
	994	-49
ВТ23 комбинированная обработка АТАО №2	249	-228,71
	352	-80,00
	497	-51,75
	703	-25,62
	994	-16,66

Таблица 1 (окончание)

ВТ23 покрытие ФТОР-ПАВ образец №2	249	-2005,36
	352	-944,85
	497	-608,54
	703	-358,23
	994	-348,19
ВТ23 покрытие ФТОР-ПАВ образец №3	249	-1728,10
	352	-830,19
	497	-515,50
	703	-304,94
	994	-297,74



а)



б)

Рис. 1. Результаты измерения остаточных напряжений на приборе «Резикон»: а) ВТ23 в исходном состоянии; б) ВТ23 после аэротермоакустической обработки

Результаты механических испытаний образцов из сплава ВТ23 и измерения остаточных напряжений после обработок по указанным в таблице режимам приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты механических испытаний образцов из сплава ВТ23 измерения остаточных напряжений после обработок по указанным в таблице режимам

Вид обработки сплава	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{ост}$. МПа на расстоянии от поверхности	
				~200мкм	~1000мкм
1. Исходный	572	957	10,3	-2400	-300
2-1 ФТОР-ПАВ . Покрытие	756	929	10,44		
2-2 ФТОР-ПАВ Покрытие	707	906	11,04		
	731	917	10,7	-1700(-2005)	-300(-358)
3-1 АТАО	743	978	10,6		
3-2 АТАО	717	985	13,1		
	730	982	11,9	-425(-230)	-50(-18)

Выводы

1. Нанесение ФТОР-ПАВ покрытия и применение АТАО уменьшает величину остаточных напряжений в поверхностном слое сплава ВТ23. При этом наиболее значительный результат достигается при применении АТАО.

2. Применение ФТОР-ПАВ и АТАО технологий наряду с уменьшением остаточных напряжений позволяет увеличить как прочность, так и пластичность сплава ВТ23.

Библиографический список

1. Шалин В. Н. Остаточные напряжения в изделиях из нагартованных материалов. 1963..
2. *Buhler H., Altmeyer G. Draht*, № 3, 1959.
3. *Понамарев С. Д., Бидерман В. Л., Лихарев К. К., Макушин В. М., Малинин Н. Н., Феодосьев В. И.* Расчеты на прочность в машиностроении. I, II часть. М.: Машгиз, 1959.
4. *Берестецкий В. Б., Лившиц Е. М., Пятаевский Л. П.* Квантовая электродинамика // Теоретическая физика, в 10 томах, т. 4. М.: Наука. 1989.
5. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. М.: 1976. С. 408 – 415.
6. *Данилин Г. А., Титов А. В., Ремиев Е. Ю.* Исследование возможностей применения метода акустической эмиссии для контроля качества нагруженных деталей, изготовленных методами штамповки // Труды II ОМНТК «Молодежь. Техника. Космос», СПб: БГТУ «Военмех», 2010. С. 163 – 167.
7. *Данилин Г. А., Титов А. В., Ремиев Е. Ю.* Методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин на основе излучения сигналов акустической эмиссии // Металлообработка. 2011. № 2. С. 17 – 21.
8. *Калугина М. С., Ремиев Е. Ю., Данилин Г. А.* и др. Комбинированный термоакустический способ модификации структуры титанового сплава // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 185 – 196.