

05

РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЭЛЕМЕНТА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА РАСКРЫТИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

© В.Е.Рябиков, В.Ю.Казаков, В.М.Аленцин

Военная инженерно-космическая академия им. А.Ф.Можайского,
Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 8 февраля 1996 г.)

В статье рассматриваются вопросы расчета термомеханических приводов раскрытия крупногабаритных космических конструкций. В связи с этим предлагаются методики расчета реактивных напряжений в сплавах ТН-1 и CuAlMn. Разработан метод инженерного расчета термомеханических приводов. На базе метода разработана методика расчета, позволяющая устанавливать массогабаритные характеристики приводов, необходимые для раскрытия конструкции определенных габаритов и массы с требуемой динамикой за необходимое время.

В последнее время вопросы разворачивания на орбите крупногабаритных космических конструкций при помощи термомеханических приводов вышли за рамки теоретических исследований и перешли в фазу практической реализации [1]. Значительный интерес представляет формирование каркасно-пленочных конструкций, состоящих из шарнирно соединенных звеньев и растянутой между ними пленки. Подобные конструкции могут обеспечивать решение широкого круга научных и хозяйственных задач в космосе, таких как прием и ретрансляция энергии, информационное обеспечение и т.д.

Условия эксплуатации каркасно-пленочных конструкций предъявляют жесткие требования к термомеханическому приводу. Он должен быть конструктивно прост, обладать возможностью длительного хранения без снижения надежности срабатывания, обеспечивать требуемую динамику раскрытия конструкции, обладать малыми габаритами и массой. Анализ различных типов исполнительных механизмов показал, что в наибольшей степени данным требованиям удовлетворяет привод с проволочным рабочим элементом из сплава ТН-1 и CuAlMn. Нагрев рабочего элемента привода до температуры окончания обратного мартенситного превращения производится, например, за счет пропуска через него электрического тока, а для обеспечения безударного раскрытия конструкции используется пружинный амортизатор.

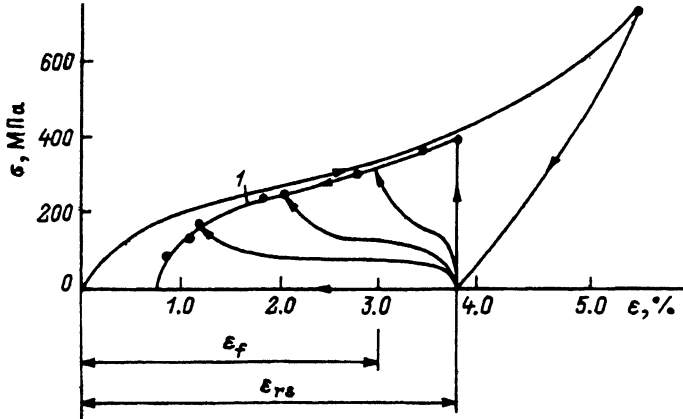


Рис. 1. Зависимость напряжений в сплаве CuAlMn от деформации.

Вместе с тем практическая реализация такого привода в настоящее время затруднена из-за отсутствия достоверной методики инженерного расчета его рабочего элемента. Это связано с тем, что существующие методы решения подобных задач не могут обеспечить научную и методическую базу для разработки методики, позволяющей корректно учитывать реальные термомеханические характеристики, проявляемые сплавами с эффектом памяти формы в условиях нелинейного нагружения, обусловленного значительной инерционностью конструкции и необходимостью гасить угловые скорости звеньев в конечной точке траектории. Кроме того, отсутствуют в достаточном объеме экспериментальные данные об основных закономерностях термомеханического возврата деформации в сплавах ТН-1 и CuAlMn при переменной жесткости противодействия.

В связи с этим были исследованы основные закономерности генерации реактивных напряжений в данных сплавах при различных переменных жесткостях противодействия. В процессе исследования установлено следующее.

У сплава CuAlMn при каждом фиксированном значении деформации начала противодействия $\epsilon_{r,s}$ и независимо от траектории восстановления деформационно-силовые характеристики завершения термомеханического возврата определяются кривой разгрузки сплава после окончания генерации реактивных напряжений при бесконечной жесткости противодействия (кривая 1 на рис. 1).

У сплава ТН-1 при каждом фиксированном значении деформации начала противодействия и независимо от траектории восстановления деформационно-силовые характеристики завершения термомеханического возврата определяются областью диаграммного поля напряжение-деформация, ограниченной кривыми зависимостей реактивных напряжений от деформации недовосстановления при возврате деформации с постоянными жесткостями противодействия (кривая 1 на рис. 2) и при возврате с жесткостями противодействия, скачкообразно изменяющими свое значение от бесконечности до нуля (кривая 2 на рис. 2). Кроме того, точки завершения возврата деформации с переменными жесткостями противодействия находятся не ниже прямой,

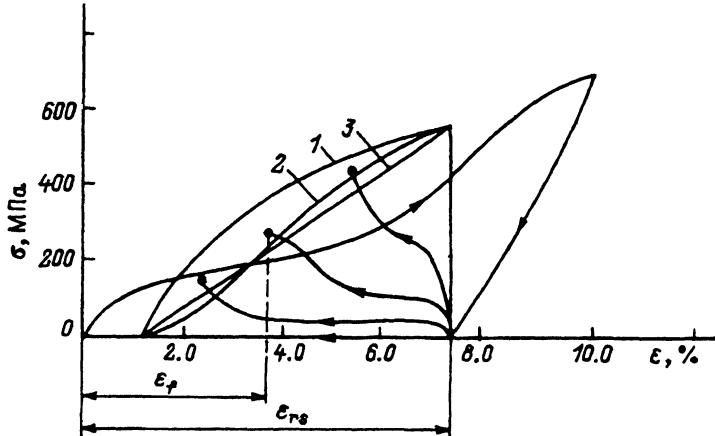


Рис. 2. Зависимость напряжений в сплаве ТН-1 от деформации.

соединяющей точки окончания возврата при бесконечной жесткости противодействия и при свободном формовосстановлении (прямая 3 на рис. 2). Поскольку в приводах раскрытия каркасно-пленочных конструкций восстанавливаемая деформация ограничена конструктивно, то данная прямая может быть определяющей при расчете реактивных напряжений, генерируемых в рабочем элементе привода. При этом ее использование позволит обеспечить запас как по реактивным напряжениям, так и по восстанавливаемым деформациям.

Установленные закономерности позволили разработать методики расчета реактивных напряжений, генерируемых в рабочих элементах привода раскрытия данных конструкций.

Для расчета реактивных напряжений в конечной точке произвольной траектории термомехнического возврата деформации сплава CuAlMn необходимо иметь экспериментальную кривую разгрузки после завершения генерации реактивных напряжений при требуемом значении деформации начала противодействия и бесконечной жесткости противодействия. Из условия обеспечения полного раскрытия конструкции определяется деформация рабочего хода ϵ_r и соответствующая ей деформация недовосстановления ϵ_f .

После этого реактивные напряжения определяются по кривой разгрузки как напряжения, соответствующие полученному значению деформации $\epsilon_f = \epsilon_{rs} - \epsilon_r$ (рис. 3, а), где ϵ_{rs} — деформация начала противодействия.

Для расчета реактивных напряжений, генерируемых в конечной точке произвольной траектории возвращаемой деформации сплава ТН-1, достаточно иметь зависимость реактивных напряжений, генерируемых при бесконечной жесткости противодействия, от деформации начала противодействия (кривая 1 на рис. 3, б). Это дает возможность получать определяющую зависимость $\sigma_r(\epsilon_f)$ при любом значении деформации начала противодействия. Для этого необходимо соединить прямой точки окончания возврата при свободном формовосстановлении и при восстановлении с бесконечной жесткостью противодействия при заданном ϵ_{rs} . Как и в случае CuAlMn , реактивные напряжения

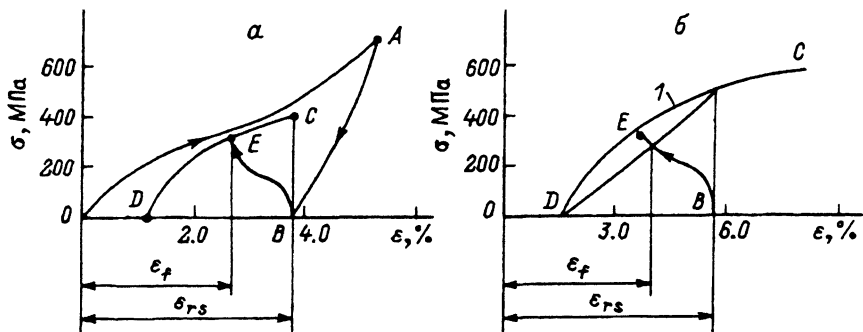


Рис. 3. Геометрическая интерпретация методики расчета реактивных напряжений в сплавах CuAlMn и ТН-1.

OA — деформирование, AB — разгрузка, BC — генерация напряжений при бесконечной жесткости системы, CD — определяющая зависимость, BE — возврат при переменной жесткости противодействия; а — CuAlMn, б — ТН-1.

определяются по расчетной зависимости после определения деформации рабочего хода, требуемой для полного раскрытия конструкции (рис. 3, б).

Расчеты, проводимые по данным методикам, показывают высокую сходимость экспериментальных и теоретических результатов. Их использование позволяет корректно учитывать реальные термомеханические характеристики, проявляемые сплавами с ЭПФ в условиях динамического нагружения.

Исходя из анализа деформационно-силовых процессов, происходящих в рабочем элементе в процессе подготовки и функционирования привода, установленных закономерностей генерации реактивных напряжений в сплавах ТН-1 и CuAlMn и общих требований к инженерному расчету, разработан метод инженерного расчета термомеханического привода раскрытия каркасно-пленочной конструкции. В данном случае под методом расчета понимается совокупность основных положений, а также подходов и принципов, применяемых для определения параметров термомеханических приводов. Основные положения создают научную, а подходы и принципы методическую базу расчета.

В качестве основных научных положений метода расчета термомеханического раскрытия каркасно-пленочной конструкции были сформулированы следующие.

Производимые перемещения и развиваемые приводом усилия определяются геометрическими размерами его рабочего элемента и зависят от термомеханических характеристик сплава с эффектом памяти формы и условий организации термомеханического возврата деформации рабочего элемента.

Основными термомеханическими характеристиками сплавов с памятью являются максимально возвращаемая предварительно наведенная деформация $\epsilon_{r \max}$, максимально развиваемые реактивные напряжения $\sigma_{r \max}$, характеристические температуры мартенситных превращений, а также определяющие зависимости для расчета реактивных напряжений (для сплава CuAlMn это — экспериментальная кривая разгрузки после завершения генерации реактивных напряжений при требуемом значении деформации начала противодействия и бесконечной жесткости противодействия, для сплава ТН-1 — зависимость реактив-

ных напряжений, генерируемых при бесконечной жесткости противодействия, от деформации начала противодействия).

Основные деформационно-силовые характеристики сплава с памятью ($\epsilon_{r \max}$, $\sigma_{r \max}$) зависят от положения температуры предварительного деформирования сплава T_d по отношению к температурам мартенситного превращения и имеют наибольшие значения при T_d близкой к M_s [2].

Скорость протекания возврата в сплавах с эффектом памяти формы определяется скоростью обратного мартенситного превращения, которая зависит от скорости нагрева [2,3].

Условия протекания возврата определяются основными его параметрами, а именно относительной деформацией начала противодействия, жесткостью противодействия, относительной деформацией рабочего хода и реактивными напряжениями, генерируемыми в сплаве при завершении возврата [4,5].

Жесткость противодействия возврату представляет собой функцию реактивных напряжений, генерируемых в процессе возврата, от восстанавливаемой деформации рабочего хода. Она не зависит от свойств сплава с памятью формы и определяется жесткостью раскрытия конструкции и площадью поперечного сечения рабочего элемента привода.

Жесткость раскрытия конструкции представляет собой функцию усилий, действующих на рабочий элемент привода, от степени раскрытия конструкции и зависит от противодействующих усилий, инерционности конструкции и времени ее раскрытия.

Деформация рабочего хода определяется перемещением, производимым рабочим элементом привода, которое зависит от перемещения выходного звена, требуемого для полного раскрытия конструкции, и способа трансформации возвращаемой деформации рабочего элемента в движение звена конструкции [6,7].

Реактивные напряжения, генерируемые сплавами ТН-1 и CuAlMn при завершении возврата, определяются в соответствии с основными закономерностями генерации реактивных напряжений в этих сплавах при переменных жесткостях противодействия, которые были сформулированы выше.

Предложен главный принцип расчета привода: массогабаритные характеристики его рабочего элемента определяются исходя из условия обеспечения рабочего хода, необходимого для полного раскрытия конструкции.

Научные положения и главный принцип легли в основу подходов к расчету массогабаритных характеристик рабочего элемента привода, которые заключаются в следующем: длина рабочего элемента задается его конструктивным исполнением; площадь поперечного сечения рабочего элемента рассчитывается исходя из условий, развиваемых приводом при завершении процесса раскрытия конструкции, и реактивных напряжений, генерируемых сплавом при завершении возврата; реактивные напряжения, генерируемые сплавом при завершении возврата, рассчитываются с использованием определяющей зависимости по значениям относительной деформации рабочего хода и относительной деформации начала противодействия, обеспечивающего требуемое перемещение звена каркасно-пленочной конструкции; отно-

сительная деформация рабочего хода привода рассчитывается исходя из реальных деформационных возможностей сплава с памятью, требуемого угла поворота звена конструкции, длины рабочего элемента привода и коэффициента трансформации возвращаемой деформации рабочего элемента в движение звена; относительная деформация начала противодействия выбирается из условия обеспечения максимального значения возвращаемой деформации; коэффициент трансформации возвращаемой деформации рабочего элемента в движение звена определяется исходя из конструктивных соображений и обеспечения требуемого значения деформации рабочего хода при выбранном значении деформации начала противодействия; усилия, развиваемые приводом при завершении процесса раскрытия конструкции, определяются с учетом инерционных характеристик конструкции, времени раскрытия, величины противодействующих приводу усилий и рассчитываются при помощи уравнения Лагранжа II рода; генерируемые в процессе функционирования привода реактивные напряжения при любом текущем значении деформации рабочего хода не должны превышать значения, соответствующие реактивным напряжениям, рассчитываемым по определяющей зависимости; энергопотребление привода рассчитывается из условия повышения температуры рабочего элемента привода до температуры окончания обратного мартенситного превращения A_f за время, требуемое для раскрытия конструкции; закон движения конструкции выбирается из условия обеспечения безударного раскрытия и представляет собой закон изменения угловых скоростей звеньев во времени.

На основе предложенного метода разработана методика расчета массогабаритных характеристик рабочего элемента термомеханического привода раскрытия каркасно-пленочной конструкции. Целью данного расчета являются определения длины l_a , площади поперечного сечения S_a и массы m_a рабочего элемента привода, а также радиуса шкива r_{pul} , при которых обеспечивается поворот звена на заданный угол за заданное время.

Последовательность расчета массогабаритных характеристик рабочего элемента привода состоит в следующем.

1. Определяется момент инерции I_x звена относительно оси вращения.
2. Рассчитывается усилие сжатия F_a пружины амортизатора

$$F_a = 0.5 I_x \pi^2 \Delta\varphi / T_p^2 h - F_f,$$

где $\Delta\varphi$ — угол поворота звена; T_p — время раскрытия конструкции; F_f — усилия, действующие на рабочий элемент со стороны пленки; h — плечо амортизатора.

3. При помощи разработанной методики рассчитывается значение реактивных напряжений σ_{rf} , генерируемых в конечной точке траектории для сплава CuAlMn

$$\sigma_{rf} = a(\varepsilon_{rs} - \varepsilon_r)^3 + b(\varepsilon_{rs} - \varepsilon_r)^2 + c(\varepsilon_{rs} - \varepsilon_r) + d;$$

для ТН-1

$$\sigma_{rf} = \sigma_r^\infty (1 - \varepsilon_r / (\varepsilon_{rs} - \varepsilon_r)),$$

где a, b, c, d — полиномиальные коэффициенты для определяющей зависимости $\sigma_r^\infty(\varepsilon_{rs})$; σ_r^∞ — реактивные напряжения, генерируемые при бесконечной жесткости противодействия; ε_p — необратимая пластическая деформация.

4. Рассчитывается площадь поперечного сечения рабочего элемента S_a

$$S_a = \frac{F_a h}{\sigma_{rf}(r_{pul} - 0.5fd)},$$

где f, d — параметры пары трения в шарнире.

5. Рассчитываются пиковые напряжения

$$\sigma_{rs} = \frac{0.5I_x \pi^2 \Delta\varphi}{F_a h T_p^2} \sigma_{rf}.$$

6. Производится сравнение пиковых напряжений со значениями напряжений, рассчитанных по определяющей зависимости $\sigma_r(\varepsilon_f)$,

$$\sigma_{rs} < [\sigma_r],$$

где $[\sigma_r]$ — предельно допустимые реактивные напряжения.

При невыполнении данного условия изменяется коэффициент трансформации r_{pul} и рассчитываются соответствующие ему новые значения параметров термомеханического возврата деформации рабочего элемента.

7. Рассчитывается длина рабочего элемента l_a , соответствующая новым значениям возврата,

$$l_a = 2T_p^2 r_{pul} (0.5F_f l + h k \Delta x + S_a \sigma_{rf} (0.5fd - r_{pul})) / \pi^2 \varepsilon_r I_x,$$

l — длина звена, k — жесткость пружины амортизатора.

8. Производится сравнение рассчитанного значения с длиной звена. Если рассчитанная длина рабочего элемента превышает длину звена, то выбирается новый сплав с памятью или повышаются параметры возврата, например за счет специальной технологии приготовления.

9. Рассчитывается масса рабочего элемента

$$m_a = \rho_a l_a S_a,$$

где ρ_a — средняя плотность сплава с эффектом памяти формы.

Расчеты, проводимые по данному алгоритму, показывают хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Таким образом, разработана методика расчета массогабаритных характеристик рабочего элемента привода, учитывающая реальные термомеханические характеристики, проявляемые сплавами ТН-1 и CuAlMn при одновременном влиянии динамических нагрузок и температурных воздействий. Кроме того, предложенный в работе метод расчета создает научную и методическую базу для создания методик инженерного расчета различных приводов. Разработанная методика расчета реактивных напряжений, генерируемых в сплавах ТН-1 и CuAlMn, может использоваться в качестве самостоятельного инструмента в задачах проектирования исполнительных механизмов из данных сплавов.

- [1] *Кравченко Ю.Д., Патрикеев Ю.И., Разов А.И., Чернявский А.Г.* // Матер. XXIX Межреспубликанского семинара "Актуальные проблемы прочности". Псков, 1993. С. 132-136.
 - [2] *Литачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П.* Эффект памяти формы. Л., 1987. 216 с.
 - [3] *Литачев В.А., Пущаенко О.В.* // Механика прочности материалов с новыми функциональными свойствами. Матер. XXIV Всесоюз. семинара "Актуальные проблемы прочности". Рубежное, 1990. С. 138-141.
 - [4] *Беляков В.Н., Хусаинов М.А.* // Матер. XXIX Межреспубликанского семинара "Актуальные проблемы прочности". Псков, 1993. С. 549-552.
 - [5] *Казиков В.Ю., Шипша В.Г., Лямин А.Е.* // Материалы с новыми функциональными свойствами. Матер. семинара. Новгород; Боровичи, 1990. С. 137-141.
 - [6] *Войтенко Ю.В., Литачев В.А.* // Матер. XXVII Межреспубликанского семинара "Актуальные проблемы прочности". Ухта, 1992. С. 23-25.
 - [7] *Литачев В.А., Мозгунов В.Ф.* // Матер. XXV Всесоюз. семинара "Актуальные проблемы прочности". Новгород, 1991. Т. 1. С. 38-44.
-