

1. Journal of Power Sources 67 (1997) 267-278. RSR Technologies, Inc., 2777 Summons Freeway, Suite 1800, Dallas, TX 75207, USA Received 3 October 1996; accepted 26 November 1996.
2. Hertz C. Fornasieri J., Hilger P., Notin M. // Proc. LABAT'93. — Vama, Bulgaria, 1993.—42 p.
3. Prengamen R. D. // J. Power Sources.—1995.—53.—P. 207.
4. Yamasaki Ken-Ichiro, Nagai Yoshiki. Stationary lead-acid battery with calcium alloy grids for use with solar cells // Progr. Batteries and Sol. Cells.—1982.—N 4.—P. 196—200.

THE STUDY OF MECHANICAL AND CORROSION PROPERTIES OF LEAD STRIP FOR CHEMICAL SOURCES OF ELECTRIC POWER

Yu. S. Chaplygina, A. P. Stoyachenko, A. L. Tarasov

The results of investigation of mechanical properties (hardness, strength, and plasticity) and corrosion behaviour of lead strip of the current manufacture are presented. On the basis of the simplex method the optimum compounds are revealed the use of which allows us to improve the qualitative characteristics of rolled strip and accumulator batteries manufactured from it.

УДК 621. 45: 535. 41

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЧЕТА РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© А. С. Лысенко

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського (ХАІ)

Пропонується розрахунково-аналітичний метод оцінки ступеня впливу перебігу процесу релаксації напружень на дієздатність групових різьбових з'єднань двигунів літальних апаратів. Метод потенційно точніший, ніж інші відомі методи, що підтверджено спеціальними експериментами.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с постоянно растущей напряженностью условий эксплуатации элементов и узлов двигателей летательных аппаратов (ДЛА) становится актуальным вопрос о протекании в них процесса релаксации напряжений. Сущность релаксационных процессов заключается в переходе узла или элемента конструкции от неравновесного состояния к равновесному, что сопровождается снижением напряжений в узле. Так, например, протекание релаксации напряжений в групповых резьбовых соединениях (ГРС) снижает усилия (момента) затяжки в крепежных элементах; процесс релаксации в материале диска, тую посаженного на вал, приводит к ослаблению усилия посадки диска, что в конечном итоге приводит к его проворачиванию на валу; релаксирующие напряжения в заневоленной пружине являются причиной того, что сила упругости пружины уменьшается, в результате чего пружина с течением времени перестает выполнять свои функции и т. д.

Таким образом, становится очевидной необходимость учитывать при проведении конструкторских и прочностных расчетов протекание релаксации напряжений в элементах и узлах ДЛА. Традиционно релаксационные явления косвенно учитываются

введением в расчеты поправочных коэффициентов. Эти коэффициенты определяются в основном эмпирическим путем, и в силу невысокой точности зачастую приводят к чрезмерной «перестраховке» при проведении прочностных расчетов. Таким образом, актуальной является проблема изыскания путей повышения точности оценки влияния протекания релаксационных явлений на работоспособность ДЛА.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Проведенный автором анализ изученности явления релаксации напряжений показал следующее.

Изучение явления релаксации напряжений и особенностей его протекания с самого начала было только посредством гипотез и экспериментов [8]. Затем по гипотезам, которые были подтверждены результатами практических исследований, строились теории, целью которых было объяснение причин возникновения явления релаксации напряжений, а также аналитическое описание хода процесса релаксации. Среди наиболее значимых теорий следует выделить теорию упрочнения Надаи и Да-

венпорта [4, 6, 7], теорию течения в формулировках Давенпорта и Л. М. Качалова [4, 6], теорию старения Зодерберга [4, 6, 7], а также теорию пластической наследственности Ю. Н. Работнова и И. А. Однига [4, 7, 8]. Каждая из этих теорий имеет свои сильные и слабые стороны, т. е. имея экспериментальное подтверждение в одном случае, она опровергается экспериментом в другом. Таким образом, до сих пор не выведено ни одной единой теории, которая бы полностью описывала причины и механизм релаксации напряжений, включая аналитическое описание явления. Следовательно, имеет смысл создание методики аналитического описания релаксации, которая объединит указанные выше теории, став, таким образом, универсальной и пригодной для расчетов любых элементов и узлов ДЛА. Основным препятствием в применении расчетов на релаксацию при конструкторских разработках ДЛА, по мнению автора, является громоздкость аналитических зависимостей и методик расчета.

Развитие экспериментальных методов исследования процесса релаксации также находится на довольно низком уровне развития. При испытаниях ГРС исследуются, как правило, только крепежные элементы [4, 6], что не вполне верно, поскольку зачастую релаксационная стойкость крепежных элементов ГРС выше, чем стойкость соединяемых деталей. Следовательно, также требуется обратить внимание на протекание релаксации напряжений именно в стойкость соединяемых деталях ГРС. Исследования же других элементов (корпусные детали, оси, валы, диски и т. д.) в статическом режиме [3, 4, 6], как правило, скорее носит характер испытаний на ползучесть материала, нежели на релаксационную стойкость. Основным препятствием в развитие новых методов исследований релаксации является сложность наблюдения за изменением напряжения при постоянной деформации, а также длительность протекания релаксации напряжений в металлах (до 40—50 тысяч часов), что трудно реализовать в лабораторных условиях.

Таким образом, для получения наиболее точных и корректных результатов исследований протекания релаксационных явлений необходимо создать новую комплексную методику, включающую в себя как методы теоретического расчета, так и методы испытаний. Предложению такого метода и посвящена данная статья.

СТРУКТУРА РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Основной ценностью предлагаемого расчетно-аналитического метода станет его «чувствительность»

к условиям, при которых протекают рабочие процессы интересующего нас узла или агрегата. Конечный результат расчетов будет учитывать все основные факторы, которые в той или иной степени оказывают влияние на протекание процесса релаксации напряжений.

Стоит также отметить, что до сих пор нет подобных методов. Как правило, при расчете крепежных элементов релаксационные явления учитываются путем ввода в расчеты различных поправочных коэффициентов. Однако, как правило, применение этих коэффициентов направлялось авторами не столько на компенсацию влияния релаксации напряжений, сколько на обеспечение должного по их мнению запаса прочности, который должен обеспечивать заданную прочность и момент затяжки даже при наличии самых различных вредных факторах влияния (возможно, что в том числе и влияние релаксации напряжений). Нельзя сказать, что такая методика расчетов не была действенной — соединения действительно работают, и в большинстве случаев достаточно эффективно. Однако, по мнению автора, дифференциация факторов влияния (в том числе и релаксации напряжений) на ГРС техники позволила бы уточнить существующие запасы прочности. Возможно, это могло бы снизить расходы материалов на детали и напряжения, действующие в ГРС (имеется в виду напряжение, развиваемое при затяжке ГРС в результате приложения крутящего момента затяжки). Если снижения не будет, то по крайней мере результаты расчетов будут гораздо корректнее тех, которые строились на основе простого принятия численных запасов прочности и поправочных коэффициентов.

Безусловно, метод расчета, представленный в данной работе, будет реализован лишь в первом приближении. Для его полной отработки потребуется проведение некоторого количества экспериментов по исследованию поведения и интересующих нас материалов, и их свойств релаксационной стойкости. Кроме того, для удобства его использования предполагается создать компьютерную программу, значительно упрощающую расчет влияния протекания процесса релаксации напряжений на ГРС. Алгоритм этой программы представлен ниже.

Областью применения данного метода могут стать практически любые задачи по расчету резьбовых соединений, в которых необходимо учитывать влияние протекания релаксационных явлений на напряжения в соединениях. После отработки применения данного метода на резьбовых соединениях, предполагается развить его и на другие элементы конструкций современного машиностроения (корпусные детали, узлы передачи сил и напряжений,

упругие элементы и т. д.).

Ниже приведем пошаговое описание применения расчетно-аналитического метода по определению влияния протекания процесса релаксации напряжений на работоспособность элементов и узлов ДЛА.

1. Расчет величин напряжений, требуемых для обеспечения работоспособности агрегата или узла.

2. Определение срока между этапами технического обслуживания, в течение которого с агрегатом не будет проводиться сборочно-разборочных работ. Этот срок должен быть рассчитан в часах, поскольку именно часами измеряется протекание релаксации напряжений.

3. Определение условий работы агрегата, среди которых: температура крепежных элементов ГРС, начальное напряжение (напряжение, требуемое для обеспечения работоспособности) и возможная предварительная деформация, имеющая место вследствие приложения начального напряжения или нагрузок при предыдущих сборках ГРС. Также необходимо оценить, будут ли в процессе работы агрегата циклические нагрузки.

4. Построение теоретической кривой релаксации напряжений и определение характера снижения напряжения в процессе работы агрегата вследствие активности релаксационных явлений.

5. По известному характеру протекания процесса релаксации напряжений в ГРС (т. е. скорости и величине снижения напряжения) и ресурсу агрегата пересчитывается величина начального напряжения (момента затяжки), чтобы по истечении указанного выше срока ресурса напряжение в ГРС не снизилось ниже расчетного. Пересчет осуществляется по уже известному закону изменения напряжения с последующей проверкой корректности применения данного закона для изменившегося (увеличившегося) начального напряжения.

В качестве апробации метода был проведен расчет протекания процесса релаксации напряжений в ГРС двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Исследовалось ГРС стыка головки блока с блоком цилиндров, состоящее из 15 стальных болтов диаметром 10 мм (двигатель М-408). Кроме того, для проверки корректности результатов расчета метода было проведено экспериментальное исследование релаксации напряжений на том же объекте. Ниже представлены результаты этих исследований.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРС

Прежде всего, согласно п. 1 предыдущего раздела были определены величины напряжений, развивае-

мые в соединении при сборке, а также построены диаграммы деформирования элементов соединения. Рассчитано было именно теоретически необходимое усилие, которое бы обеспечивало герметичность указанного стыка при данных условиях работы агрегата (использовалась методика [2]). В результате построена диаграмма усилий и деформаций деталей соединения (рис. 1), а также рассчитан теоретический момент затяжки болтов исследуемого ГРС.

Здесь стоит обратить внимание также, что требуемый по техническим условиям эксплуатации двигателя «Москвич-408» момент M_{tp} затяжки болтов рассматриваемого ГРС составляет 90—100 Н·м. При этом расчетный момент M_{pac} , вычисленный из условия обеспечения герметичности стыка при рассчитанном максимальном давлении, составляет величину, меньшую почти в одиннадцать раз:

$$\frac{M_{tp}}{M_{pac}} = \frac{P_{tp}l}{P_{pac}l} = \frac{2480}{224} \approx 11.$$

Данное расхождение можно объяснить прежде всего принятием при расчетах двух запасов прочности, которые обычно применяются при расчетах крепежных элементов: запас прочности по амплитуде переменных напряжений $n_a = 2.5...4.0$, и по максимальному напряжению $n_o = 1.25...2.5$ [2]. Не исключено, что при расчетах данного двигателя брались именно максимальные значения этих запасов.

Следующим этапом расчетов были: расчет срока службы между обслуживанием двигателя, а также

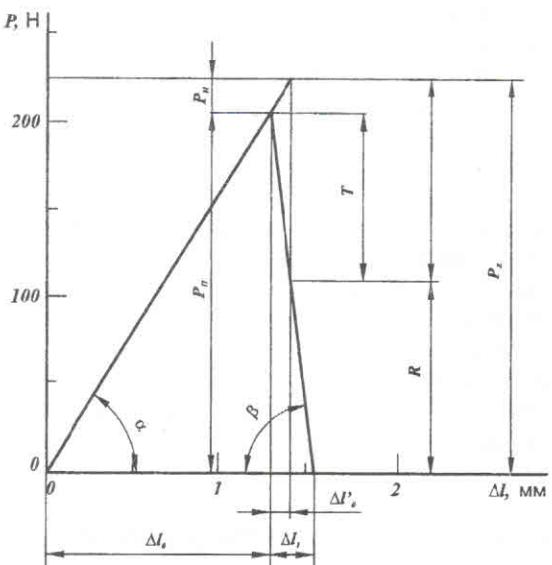


Рис. 1. Диаграмма усилий и деформаций соединения головки блока с блоком цилиндров ДВС

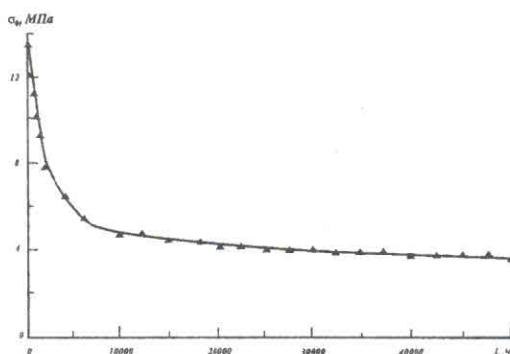


Рис. 2. Кривая релаксации напряжений без дозатяжки ГРС

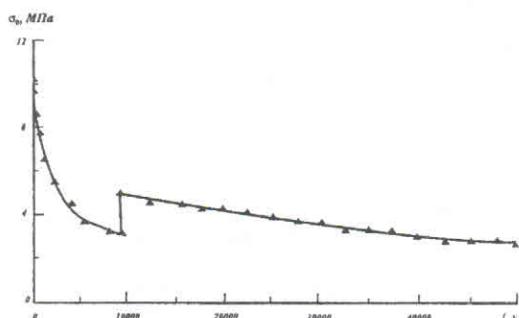


Рис. 3. Кривая релаксации напряжений с дозатяжкой ГРС

определение многочисленных факторов, влияющих на протекание релаксации. Опустим подробное описание этих пунктов, сказав лишь, что в качестве гарантированного срока эксплуатации между ТО был принят срок 50000 ч, а факторы влияния нашли отражение в значениях функций влияния.

Предлагаемый метод базируется на теории пластической наследственности Ю. Н. Работнова и И. А. Однинга [4, 6, 8]. Согласно этой теории релаксирующие напряжения описываются следующей зависимостью:

$$\sigma(t) = E\varepsilon_k \left[1 - \int_0^t T(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

где $T(t)$ — функция скорости релаксации.

Функция скорости релаксации, или так называемая функция влияния, имеет следующий вид:

$$T(t) = Ae^{-\beta t^\alpha} - 1.$$

Таким образом, для построения кривой релаксации напряжений, представляющей собой зависимость $\sigma(t)$, необходимо определить параметры функции влияния A , α , β . Они определяются пока что исключительно по результатам экспериментальных данных. Дело в том, что эти параметры зависят только от условий работы агрегата и от свойств материала, из которого изготавляются его узлы и элементы. Современное состояние вопроса изученности протекания процессов релаксации напряжений не позволяет просчитать их аналитически. Поэтому в данной работе воспользуемся эмпирическими данными, полученными в результате проведенных ранее экспериментов.

Расчет релаксирующих напряжений по соотношению (1) проводился с помощью специальной программы. В его результате были построены две кривые релаксации напряжений, одна из которых соответствует режиму эксплуатации без дозатяжки ГРС в течении гарантийного срока службы (рис. 2),

а другая — с дозатяжкой после 7000 ч с начала эксплуатации (рис. 3).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРС

Как уже упоминалось, для проверки корректности результатов расчета метода было проведено экспериментальное исследование релаксации напряжений на том же объекте. Наблюдение за изменением напряжений в исследуемом ГРС осуществляется методами голографической интерферометрии реального времени [1]. Все данные, получаемые в ходе эксперимента, обрабатываются с помощью компьютерной и цифровой техники. Выбор именно этих технических средств обусловлен высокой точностью и наглядностью результатов, получаемых при применении голографической интерферометрии, а также удобством и высокой скоростью обработки результатов испытаний компьютерной техники.

Эксперимент длился примерно 720 ч. Была охвачена лишь первая стадия протекания релаксации напряжений. Безусловно, это не позволяет вести речь о завершенности эксперимента, однако для проведения испытаний, в течение которых релаксация пройдет полностью (для металлов это порядка 40—50 тысяч часов), необходимо проводить специальное моделирование протекания релаксации напряжений (например, методами температурно-силовых аналогий), что в рамках данной работы не было предусмотрено.

Эксперимент проходил следующим образом. ГРС затягивался с моментом 75 Н·м, после чего проводилось первое экспонирование. На голографической пластиине фиксировалась картина полос, соответствующая первоначально нагруженному состоянию ГРС. Пластина обрабатывалась и устанавливалась

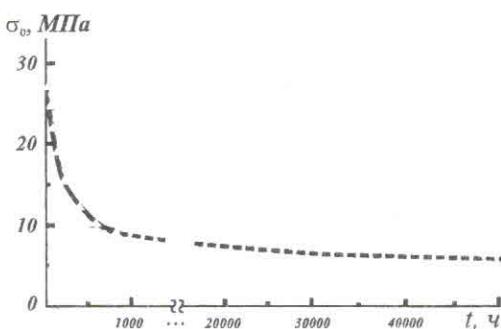


Рис. 4. Экспериментально полученная кривая релаксации напряжений

на прежнее место, что позволяет в дальнейшем сравнивать реальную измененную картину интерференционных полос с картиной исходного состояния. Следующее экспонирование проводилось через 50 ч. При этом интерференционная картина полос уже фиксировалась с помощью цифровой фотокамеры, что позволяет уже обойтись без дополнительных фотопластин и облегчает ввод изображения голограмм в компьютер. Через 100 ч было получено очередное изображение, следующие — через 210, 355, 410, 530, 600 и 720 ч.

После завершения эксперимента проводилась расшифровка полученного набора интерференционных картин для определения изменения напряжений в ГРС, на основании которой была построена экспериментальная диаграмма релаксации напряжений (рис. 4).

Анализ теоретических и экспериментальных данных показал следующее. Как уже отмечалось ранее, проведенный эксперимент обладает рядом недочетов, которые снижают точность получаемых результатов. При этом и теоретический расчет также не дает пока что высокой точности, так как графики функции влияния (которая является основой расчетов) имеют невысокую точность ввиду недостатка экспериментальных данных по протеканию релаксации в различных металлах и сплавах.

Несмотря на эти негативные моменты, уже заметно, что результаты теоретических расчетов подтверждаются экспериментальными данными. Так, за истекшие 720 ч произошло снижение напряжение с 27.3 до 23.4 МПа, что соответствует падению на 15 %. Согласно же теоретическим расчетам в течение первого периода протекания процесса ре-

лаксации (более крутая часть кривой релаксации) за время до 2500 ч наблюдается снижение с 13.7 до 12.2 МПа, что так же соответствует 15 %-й разнице.

Таким образом, расчетно-аналитический метод дает достаточно корректные для первого приближения результаты, что делает необходимым продолжения работ по развитию математического аппарата расчетов протекания релаксации напряжений в материалах узлов и элементов ДЛА. В настоящее время сотрудниками научно-исследовательской лаборатории ЛУЧ (Национальный аэрокосмический университет (ХАИ), г. Харьков) проводятся работы по отработке комплексной методики теоретических и экспериментальных исследований протекания релаксации напряжений в элементах и узлах ДЛА (с использованием компьютерных технологий ввода и обработки данных, а также методик температурно-силовых аналогий [5]).

- Голографические исследования релаксационных явлений в резьбовых соединениях РКТ с применением компьютерных технологий // А. А. Капустин, А. С. Лысенко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. — Харьков, 2001.—Вып. 27(4).—С. 102—106.
- Двигатели внутреннего сгорания. Конструкция и расчет поршневых и комбинированных двигателей // Под ред. А. С. Орлина. — М.: Машиностроение, 1972.—464 с.
- Испытательная техника для исследования механических свойств материалов // А. П. Волощенко, М. М. Алексюк, В. Г. Гришко и др. — Киев: Наукова думка, 1984.—319 с.
- Ползучесть элементов конструкций // Ю. Н. Работнов. — М.: Наука, 1966.—752 с.
- Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний // И. З. Аронов, Е. Л. Бурдасов — М.: Изд-во стандартов, 1987.—184 с.
- Расчеты на прочность в машиностроении // С. Д. Пономарев и др. — М.: МашГИз, 1958.—2 т.—976 с.
- Релаксационные явления в металлах и сплавах // Под ред. В. С. Постикова. — М.: Металлургия, 1963.—340 с.
- Релаксационные явления в металлах и сплавах // Под ред. Б. Н. Финкельштейна. — М.: Металлургия, 1960.—326 с.

DEVELOPMENT OF RATED-ANALYTICAL METHOD FOR REGISTRATION OF STRESS RELAXATION EFFECT ON FUNCTIONALITY OF UNITS OF FLIGHT VEHICLE ENGINE

A. S. Lysenko

A rated-analytical method for the estimation of stress relaxation effect on functionality of formation of thread joints of flight vehicle engines is proposed. This method is more potentially accurate in comparison with present methods, which is confirmed by additionally conducted experimental researches.