

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ

© 2008 В. А. Барвинок¹, Ю. Е. Паламарчук², А. Н. Кирилин²,
В. П. Самохвалов¹, В. М. Вершигоров²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
²ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Приведены основные классы индукторных систем, применяемых в магнитно-импульсной штамповке. Отмечены факторы, влияющие на эксплуатационные свойства конструкции. Рассмотрены основные режимы работы индукторных систем: на высокочастотных и низкочастотных установках и в режиме многоциклового нагружения. Приведены аналитические выражения, позволяющие оценить среднюю температуру токопровода индуктора.

Технологические процессы, магнитные поля, индукторы, тепловые поля, ресурс, температурные напряжения

Одним из методов высокоскоростного деформирования трубчатых и листовых заготовок является магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) с применением импульсных магнитных полей (ИМП) высокой напряжённости.

Магнитно-импульсная штамповка получила большое распространение на предприятиях электротехнической промышленности, общего машиностроения, судостроения и особенно ракетно-космической и авиационной промышленности, где около 75 % всех деталей изготавливается из листов, труб, профилей методами обработки давлением в заготовительно-штамповочных цехах.

Внедрение технологических процессов деформирования заготовок с помощью ИМП обеспечивает требуемую точность и высокое качество деталей при ликвидации ручных и доводочных работ, снижение трудоёмкости работ, улучшает условия труда и культуру производства.

Большое количество работ в области магнитно-импульсной штамповки металлов посвящено исследованию электрических процессов в системе индуктор-заготовка и разработке технологических процессов изготовления деталей с использованием энергии ИМП.

Однако более широкое внедрение МИОМ сдерживается отсутствием исследований по созданию надёжного инструмента

для технологических операций, которым является индуктор.

Технологический ресурс индукторов для некоторых видов операций составляет 5-100 импульсов при достаточно высокой трудоёмкости их изготовления и больших материальных затратах.

Большие возможности метода МИОМ в технологических процессах получения деталей летательных аппаратов вызвали разнообразие создаваемых и существующих конструкций цилиндрических индукторов. Число признаков, по которым они отличаются друг от друга, велико: это конструкция токопровода, форма сечения витка, способ изоляции спирали, форма основания и т. д.

Существуют индукторы двух классов: на обжим и на раздачу. Каждый класс можно разделить на два типа: индукторы с витым и точеным токопроводами. Индукторы с витым токопроводом изготавливаются из медной проволоки прямоугольного сечения, изолированной плёночными диэлектриками. Точеные индукторы включают в себя всю гамму конструкций, рабочий элемент которых изготовлен точением или фрезерованием из пруткового или листового материала. При малых диаметрах обрабатываемых деталей применяют биметаллические токопроводы.

Эксплуатация индукторов в условиях обработки больших партий деталей сопровождается выделением в токопроводе боль-

шого количества тепла от “джоулевого” нагрева материала.

Нагрев материала токопровода индуктора, витковой изоляции и корпусных элементов существенно влияет на эксплуатационные характеристики индукторных систем, а в некоторых случаях - на количество получаемых деталей.

Экспериментальное определение температуры при высокоскоростном деформировании встречает большие трудности. Основная трудность заключается в том, что датчик температуры, находящийся внутри деформируемого металла, должен работать в крайне тяжёлых условиях - при высоких удельных нагрузках, сопровождающихся относительными перемещениями деформируемых объёмов металла. Датчик должен быть практически безынерционным, должен регистрировать изменения температуры, происходящие в малые промежутки времени при скорости изменения температуры порядка сотен градусов в секунду, и не должен влиять на условия деформирования.

Кроме того, в процессе деформирования импульсным магнитным полем в датчиках появляются наводки, которые существенно искажают сигнал и создают большие трудности при расшифровке осциллограмм процесса измерения. Синхронизация процесса разряда батарей конденсаторов установки и запуска измерительной аппаратуры с соответствующей задержкой также весьма затруднена. Были применены методики определения температуры в деформируемом металле в процессе формоизменения с последующим замером конечной температуры заготовки после завершения процесса деформирования, а также методики прямого измерения на основе электронно-оптического преобразователя.

Для определения температуры нагрева токопровода импульсными токами в процессе деформирования использовалась температурная зависимость изменения удельного электросопротивления материала

$$r' = r'_0 (1 + b Q), \quad (1)$$

где r' - удельное электросопротивление материала при измеряемой $T^\circ\text{C}$; r'_0 - удельное

электросопротивление материала при $T=20^\circ\text{C}$; b - температурный коэффициент; Q - тепло, вызвавшее изменение электросопротивления.

Количество тепла, выделившегося в теле при прохождении по нему тока, может быть определено из выражения

$$dQ = j^2 r' dt. \quad (2)$$

Плотность тока в токопроводе индуктора

$$j = \frac{J(t)}{\Delta_i l_3}, \quad (3)$$

где D_i - толщина скин-слоя токопровода; l_3 - длина токопровода; J - интегральный ток, проходящий по индуктору.

Величину скин-слоя можно определить также по формуле

$$\Delta_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0 g f_1}}, \quad (4)$$

где f_1 - частота процессов разряда.

Решая совместно уравнение (3) и (4), получим

$$r' = r'_0 l \frac{br'_0}{\Delta_i^2 l_3^2} \int_0^t J^2(t) dt. \quad (5)$$

При деформировании ИМП ток в индукторе изменяется по закону (рис. 1):

$$J(t) = J_0 e^{-dt} \cdot \sin wt, \quad (6)$$

где J_0 - ток в заготовке при $t = 1/4T$; e^{-dt} - декремент колебаний; T - период разряда батарей конденсаторов; w - частота тока разряда; t - время процесса разряда.

После подстановки и интегрирования получаем

$$r' = r'_0 l \frac{br'_0}{\Delta_i^2 l_3^2} \frac{J_0^2}{(d^2 + w^2)} \left[\frac{w^2}{2d} e^{-2dt} \left(d \sin wt + w \cos wt \sin wt + \frac{w^2}{2d} \right) \right] \quad (7)$$

Учтём, что

$$\frac{r'}{r'_0} = 1 + \frac{C_n m T^0 b}{V}, \quad (8)$$

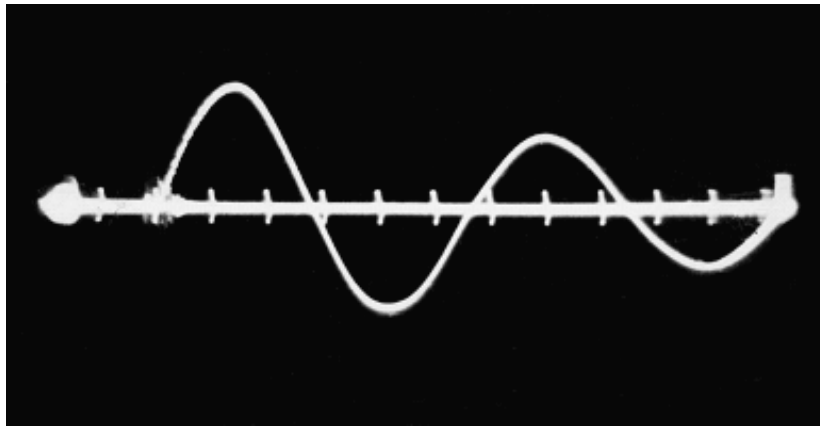


Рис. 1. Оциллограмма тока, снятого в процессе разряда батарей конденсаторов при высокоскоростном деформировании ИМП, $W = 4,8$ кДж

где C_v - теплоёмкость материала токопровода; m - масса токопровода; V - объём; T^0 - температура в токопроводе, вызвавшая изменение удельного электросопротивления. Получим изменение температуры при прохождении вихревых токов по виткам

$$\Delta T^0 = \frac{r' / r_0' - 1}{C_n m b \cdot \frac{1}{V_3}}, \quad (9)$$

где r' / r_0' подсчитывается по формуле (7).

На рис. 2 приведён график изменения температуры токопровода в процессе высокоскоростного деформирования ИМП при

различных величинах энергии, запасаемой в батареях конденсаторов установки. Величина тока J_0 , частота процесса разряда и величина декремента затухания процесса определялись экспериментально по оциллограммам тока, снятым в процессе деформирования.

Из графика видно, что уже при небольших энергиях ($W = 3,3-5,1$ кДж) токопровод нагревается к концу процесса до температуры 100°C . С увеличением энергии происходит более интенсивный нагрев “скин-слоя” токопровода. При больших энергиях ($W = 11,8-20$ кДж) нагрев материала весьма значителен. К 20-й микросекунде токопровод нагревается до температуры свыше 100°C . При этом прочностные свойства материала не

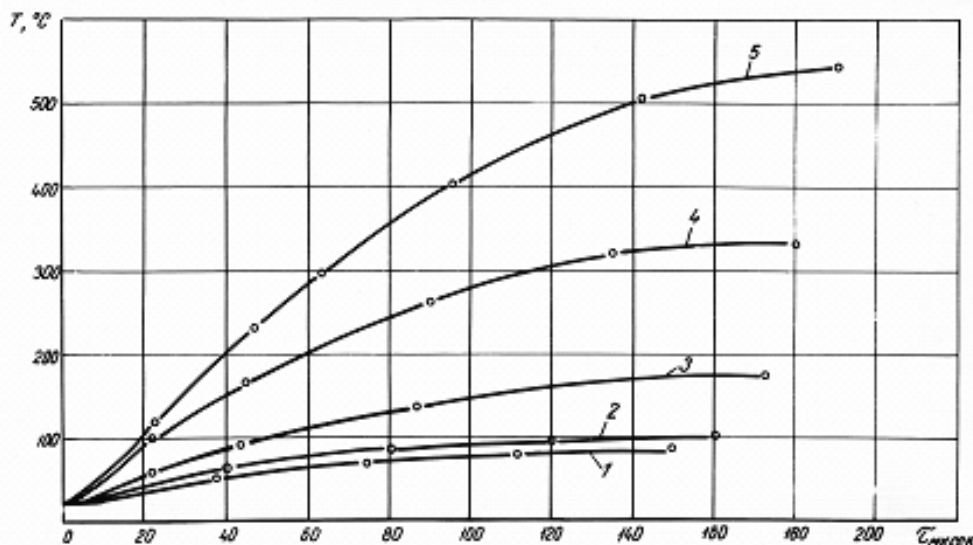


Рис. 2. Изменение температуры скин-слоя токопровода АЕ 75 мм во времени: 1 - $W = 3,3$ кДж, 2 - $W = 5,1$ кДж, 3 - $W = 8,6$ кДж, 4 - $W = 11,8$ кДж, 5 - $W = 20,0$ кДж

снижаются и не повышается его пластичность. К 60-й микросекунде температура повышается до 160-230°C. В результате нагрева происходит значительное снижение прочностных свойств материала. Предел текучести материала σ_T токопровода при этом снижается в 1,3-1,5 раза, предел прочности σ_B - в 1,4-1,7 раза, а пластичность δ увеличивается на 80 % (рис. 3).

Температура к моменту времени процесса формоизменения, равному 20 % от всего времени деформирования, составляет уже 45-50 % от величины конечной температуры. К концу процесса разряда температура в скин-слое токопровода повышается до 300-500°C.

Из анализа графиков можно сделать вывод, что в процессе высокоскоростного деформирования ИМП токопровод в скин-слое нагревается протекающими по ней вихревыми токами до весьма больших температур, зависящих в конечном итоге от величины энергии разряда. Этот нагрев происходит за 160-180 мксек, т.е. процесс нагрева протекает практически адиабатически. Температура в скин-слое к концу процесса деформирования может достигать величины 300-500°C.

Исследование процесса выравнивания температуры по витку можно считать как распределение температуры в однородном цилиндре, который при $t \approx 0$ мгновенно нагревается источником тепла, расположенным на

расстоянии “ r ” от всей цилиндрической плоскости. Это описывается выражением

$$T(r, \tau) = \frac{b}{\pi R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_1^2(\mu_n)} \cdot J_0\left(\mu_n, \frac{r}{R}\right) \times \\ \times J_0\left(\mu_n, \frac{r}{R}\right) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot F_0),$$

где μ_n - корни бесселевой функции первого ряда первого порядка.

При адиабатическом нагреве толсто-стенного цилиндра процесс выравнивания температуры условно можно рассматривать как процесс перераспределения тепла в двух пластинах, одна из которых нагрета до температуры T° , а другая имеет температуру окружающей среды (рис. 4).

Начальные условия:

$$T_{t=0} = T_{0,1} (0 \leq x \leq h_1); T_{t=0} = T_{0,2} (h_1 < x \leq t).$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=t} = 0.$$

Полное перераспределение тепла произойдет при

$$F_0 \frac{at}{b^2} = 0,5,$$

где F_0 - критерий Фурье; t - время выравнивания температуры; b - толщина заготовки;

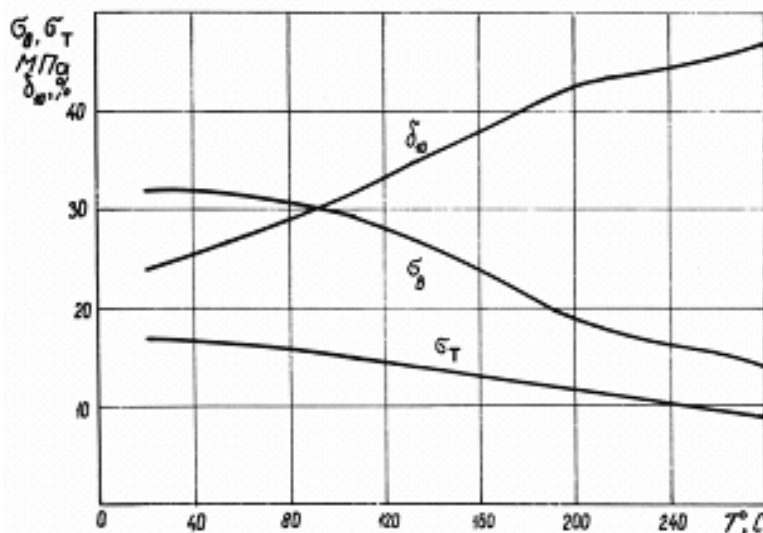


Рис. 3. Изменение механических характеристик медного токопровода в зависимости от температуры

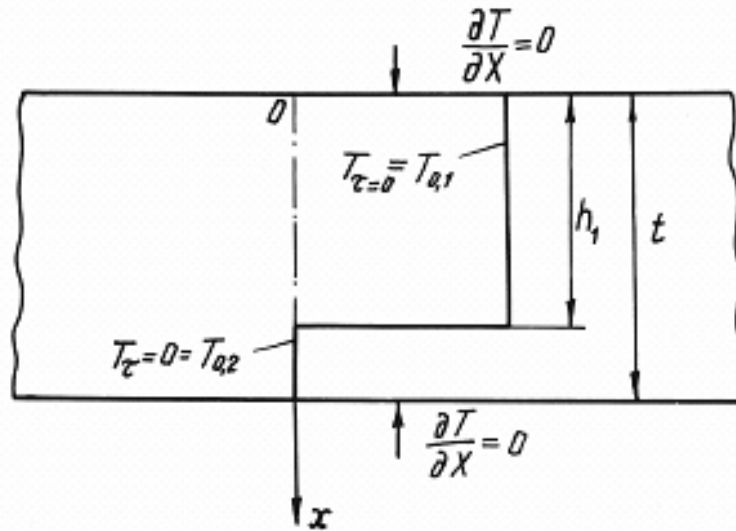


Рис. 4. Тепловая схема, используемая при анализе процесса перераспределения тепла

α - коэффициент температуропроводности материала заготовки.

Для измерения температуры на поверхности витков в экспериментальных исследованиях применялась разработанная измерительная система на электронно-оптическом принципе, схема которого приведена на рис. 5. На поверхности заготовки был закреплён один торец стекловолоконного световода. На торцевую поверхность световода с противоположной стороны был закреплён фотопреобразователь (фотосопротивление из монокристаллического германия ГЭС 40/0,3) с инерционностью до $10 \cdot 10^{-6}$ сек. Осциллограмма мгновенного роста температуры на поверхности детали из материала М1 толщиной $S = 4$ мм для случая процесса калибровки на раздачу приведена на рис. 6. Длительность осциллографированного процесса составляет 160 мксек. Время действия импульса тока разряда порядка 30-32 мксек,

что видно на осциллограмме нижнего луча осциллографа. Из представленных данных видно, что температура на поверхности заготовки растёт до окончания действия тока и сохраняется в течение 25-30 мксек на максимальном уровне. За счёт конвективного и диффузионного теплообмена виден плавный переходный процесс до момента выравнивания температуры по всему объёму витка. Характер изменения температуры в индукторе в зависимости от вида технологической операции приведён на рис. 7-9. Полученные результаты подтверждают правильность выбранных допущений и начальных условий при моделировании процессов.

Разработанная методика позволяет определить температуру в витках индуктора заготовки при магнитно-импульсной штамповке в любой момент времени процесса деформирования.

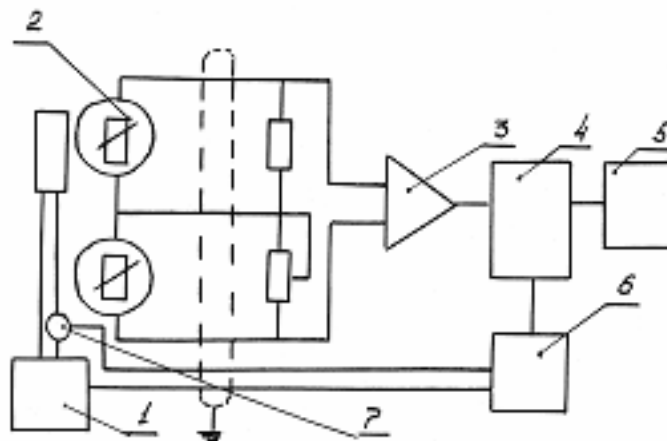


Рис. 5. Принципиальная схема измерительной системы: 1 - МИУ, 2 - фотосопротивление, 3 - интегратор, 4 - осциллограф, 5 - блок синхронизации, 6 - блок запуска, 7 - датчик тока

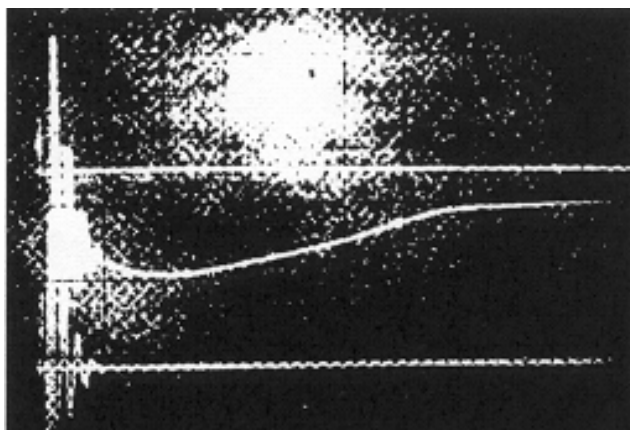


Рис. 6. Осциллограмма сигнала, полученного при измерении температуры оптоэлектронным методом

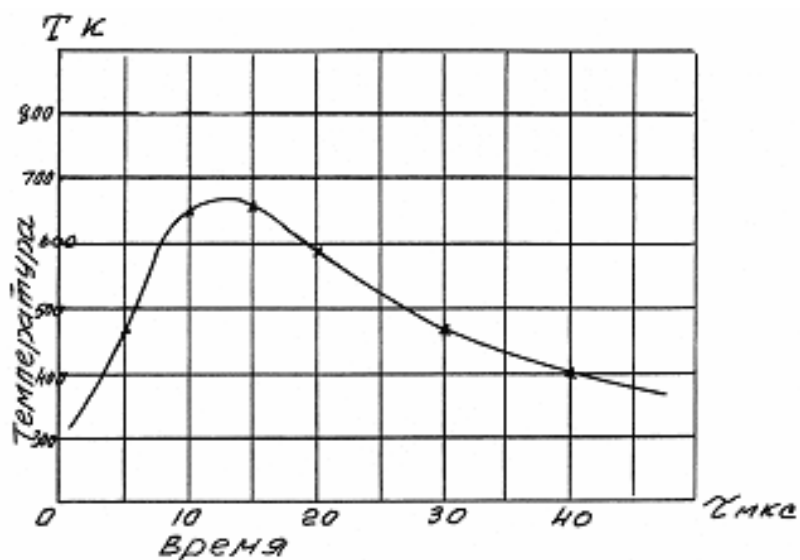


Рис. 7. Характер изменения температуры в витке при формовке деталей на низкочастотных установках

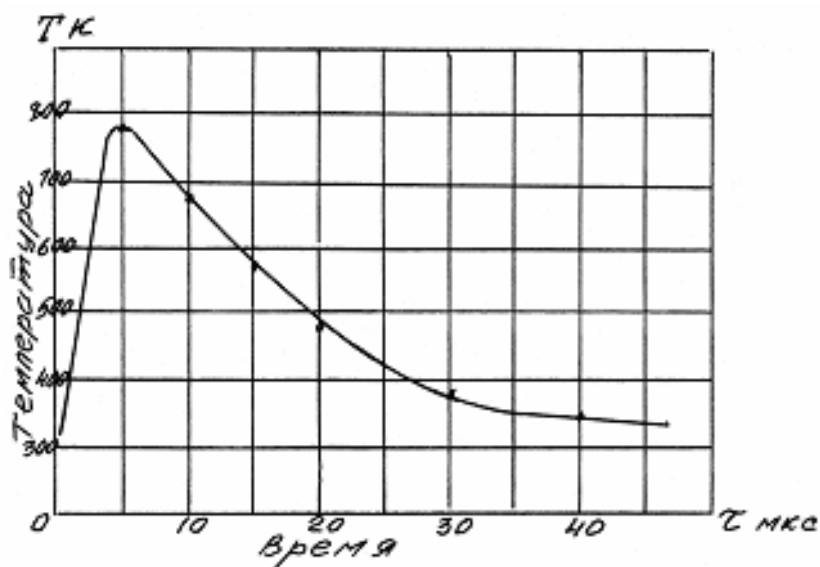


Рис. 8. Характер изменения температуры в витке при обработке на высокочастотной установке

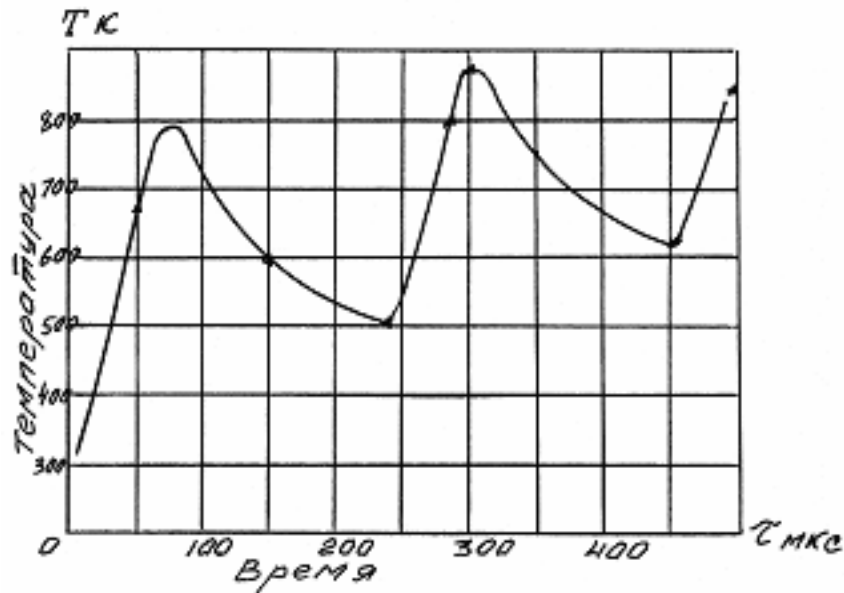


Рис. 9. Характер изменения температуры в витке при многократном нагружении

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THERMAL FIELDS IN INDUCTOR SYSTEM UNDER MAGNETIC PULSE FORMING

© 2008 V. A. Barvinok¹, Yu. Ye. Palamartchuk², A. N. Kirilin²,
V. P. Samokhvalov¹, V. M. Vershigorov²

¹Samara State Aerospace University

²Central Design Bureau "Progress"

The paper describes the basic classes of inductor systems used in magnetic pulse forming. Factors having effect on the service properties of the construction are noted. The basic modes of inductor system operation are discussed: at high-frequency and low-frequency installations and in the multicycle loading mode. Analytical expressions are given that make it possible to determine the average temperature of a current-conducting inductor.

Technological processes, magnetic fields, inductors, thermal fields, resource, temperature stresses

Информация об авторах

Барвинок Виталий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор НИИ технологий и проблем качества, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. Область научных интересов: физика и математическое моделирование тепловых и деформационных процессов в твёрдых телах, разработка физических и математических моделей процессов взаимодействия ускоренных потоков плазмы с твёрдым телом.

Паламарчук Юрий Ефимович, начальник отдела, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Кирилин Александр Николаевич, генеральный директор, доктор технических наук, профессор, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Самохвалов Владимир Петрович, доцент, СГАУ, доктор технических наук, профессор.

Вершигоров Вячеслав Михайлович, заместитель генерального директора по общим вопросам, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Barvinok, Vitaly Alexyevitch, Doctor of Technical Science, professor, Correspondence Member of the Russian Academy of Sciences. Director of Research Institute of technologies and quality problems, Head of the Department of aircraft construction and quality management in mechanical engineering. Area of research: physics and mathematical modeling of thermal and deformation processes in solids, developing physical and mathematical models of processes of interaction between accelerated plasma flows and a solid body.

Palamartchuk, Yuri Yefimovitch, head of department, Central Design Bureau “Progress”.

Kirilin, Alexander Nikolayevitch, general director, doctor of Technical Science, professor, Central Design Bureau “Progress”.

Samokhvalov, Vladimir Petrovitch, Associate Professor, SSAU, Doctor of Technical Science, professor.

Vershigorov, Vyacheslav Mikhailovitch, Deputy General Director for General Matters, Central Design Bureau “Progress”.