

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

© 2008 В. А. Барвинок<sup>1</sup>, Ю. Е. Паламарчук<sup>2</sup>, А. Н. Кирилин<sup>2</sup>,  
В. П. Самохвалов<sup>1</sup>, В. М. Вершигоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
<sup>2</sup>ФГУП 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

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

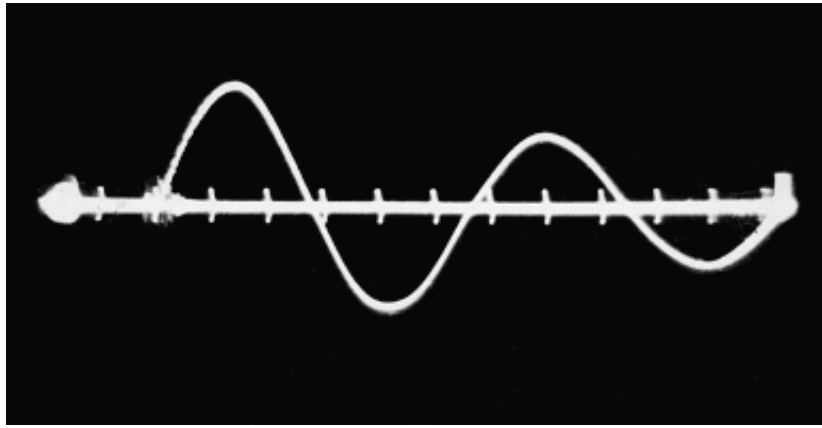


Рис. 1. Осциллограмма тока, снятого в процессе разряда батарей конденсаторов при высокоскоростном деформировании ИМП,  $W = 4,8$  кДж

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 осциллограммам 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  $100^\circ\text{C}$ . 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  $100^\circ\text{C}$ . При этом прочностные свойства материала не

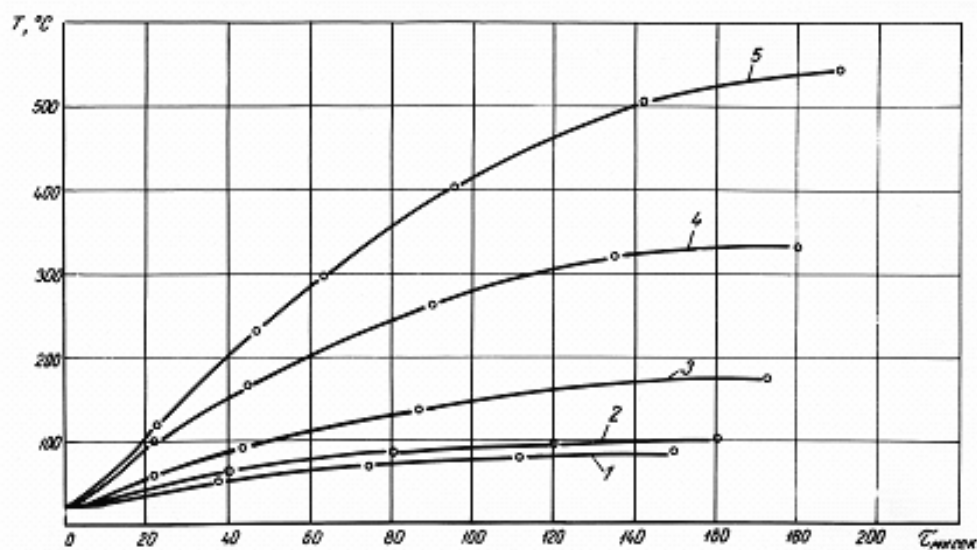


Рис. 2. Изменение температуры скин-слоя токопровода АЕ75 мм во времени: 1 -  $W = 3,3$  кДж, 2 -  $W = 5,1$  кДж, 3 -  $W = 8,6$  кДж, 4 -  $W = 11,8$  кДж, 5 -  $W = 20,0$  кДж

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  $\sigma_T$  токопровода при этом снижается в 1,3-1,5 раза, предел прочности  $\sigma_B$  - в 1,4-1,7 раза, а пластичность  $\delta$  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  $\mu_n$  - 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  $T^\circ$ , а другая имеет температуру окружающей среды (рис. 4).

Начальные условия:

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

Граничные условия:

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

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;

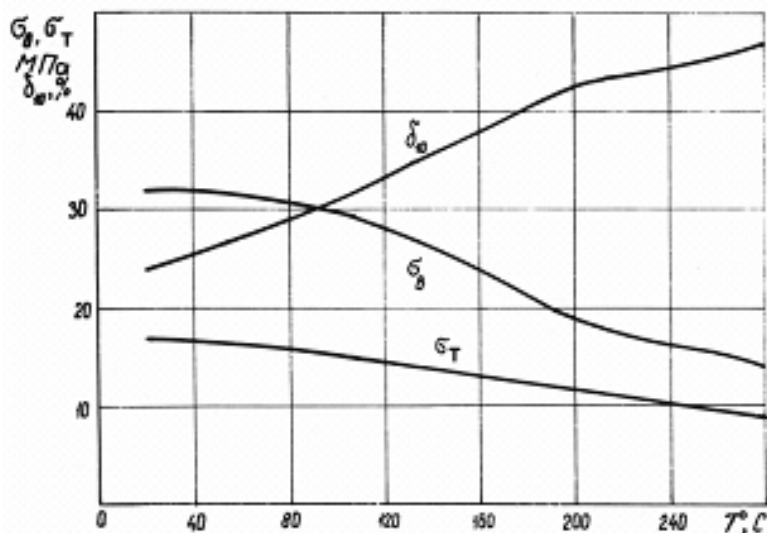


Рис. 3. Изменение механических характеристик медного токопровода в зависимости от температуры

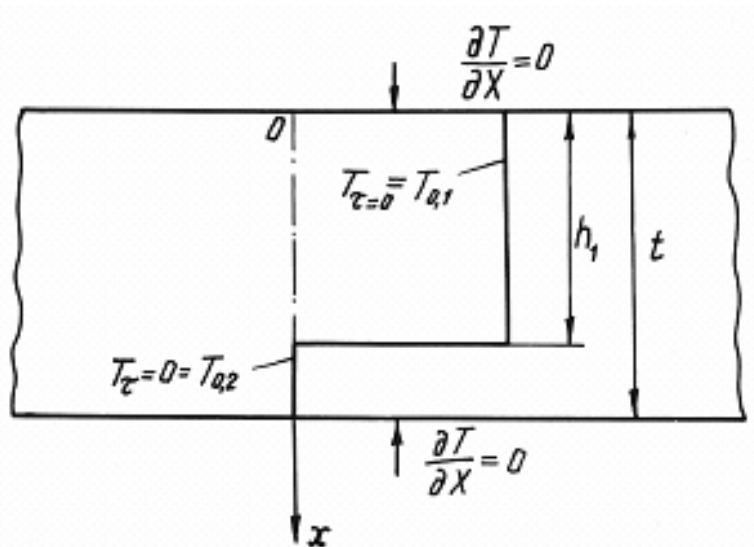


Рис. 4. Тепловая схема, используемая при анализе процесса перераспределения тепла

$a$  - 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.

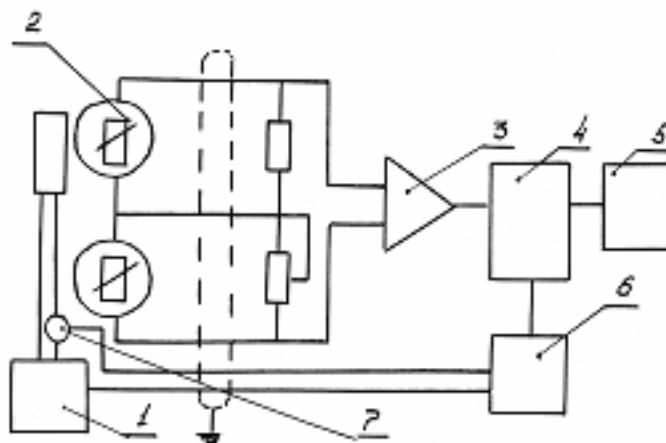


Рис. 5. Принципиальная схема измерительной системы: 1 - МИУ, 2 - фотосопротивление, 3 - интегратор, 4 - осциллограф, 5 - блок синхронизации, 6 - блок запуска, 7 - датчик тока

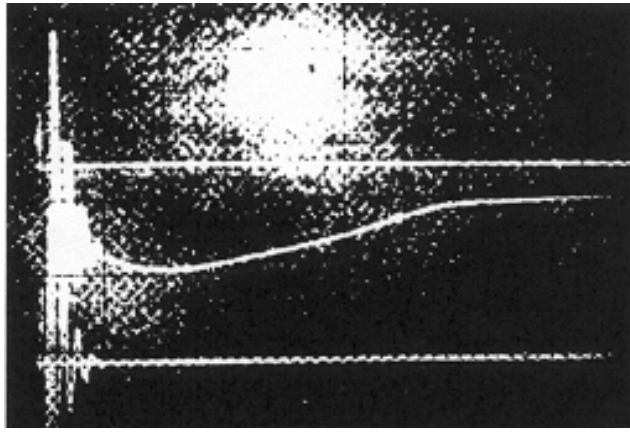


Рис. 6. Осциллограмма сигнала, полученного при измерении температуры оптоэлектронным методом

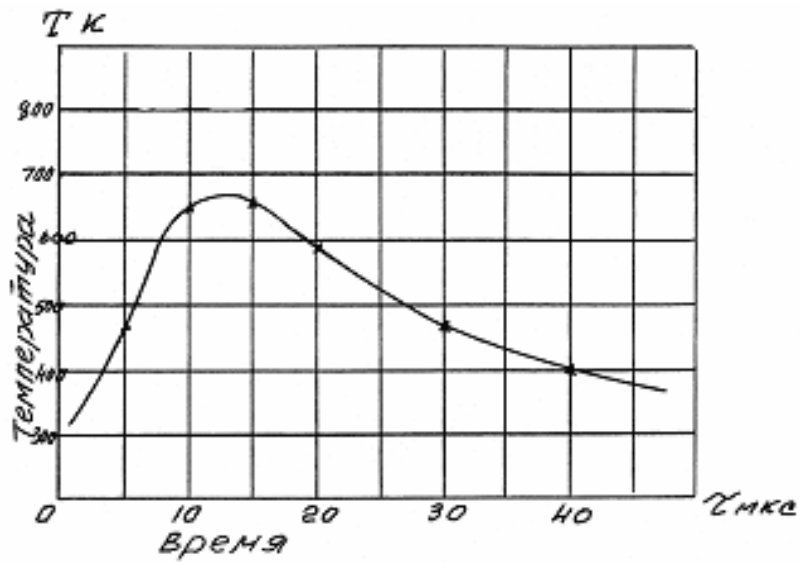


Рис. 7. Характер изменения температуры в витке при формовке деталей на низкочастотных установках

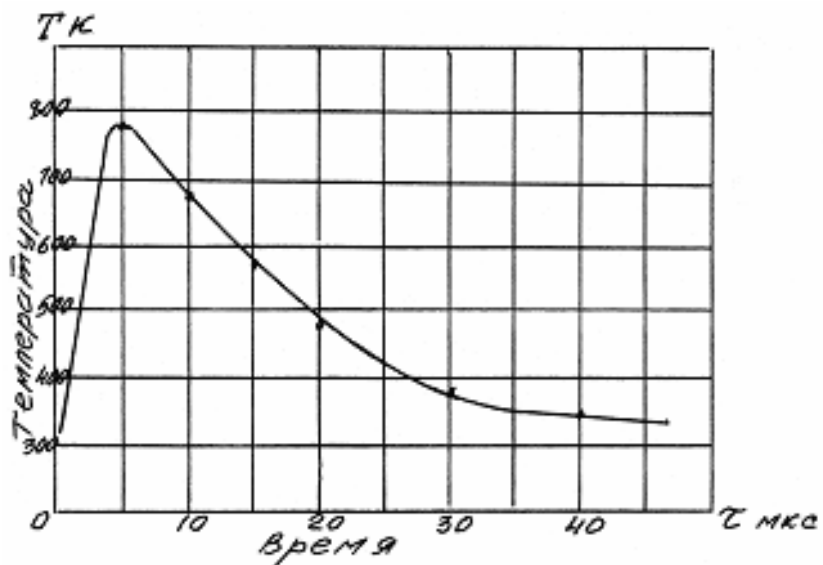


Рис. 8. Характер изменения температуры в витке при обработке на высокочастотной установке

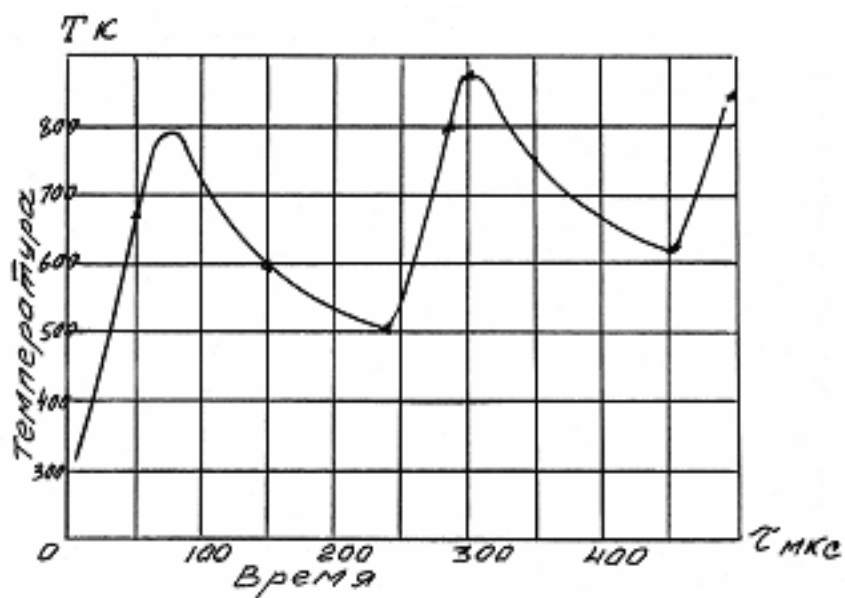


Рис. 9. Характер изменения температуры в витке при многократном нагружении

### 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».