

## ИССЛЕДОВАНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

© 2005 В.П. Самохвалов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Проведен анализ методов математического моделирования технологических процессов высокоскоростного деформирования материалов, характерных для магнитно-импульсной обработки. В зависимости от вида постановки смешанной задачи математической физики, описывающей процесс, рассмотрены численные методы решения и их сравнительная эффективность.

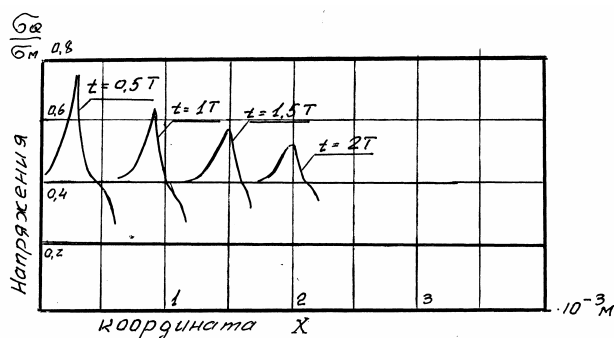
В современных условиях производства изделий авиационно-космической техники наиболее значимыми становятся задачи обеспечения показателей надежности при снижении весовых характеристик деталей и узлов и повышении экономической эффективности их изготовления. Одним из эффективных методов изготовления деталей является магнитно-импульсная штамповка.

В существующих технологиях изготовления деталей давлением импульсного магнитного поля (импульсного магнитного поля) одновременно присутствуют несколько факторов, обуславливающих оптимальные параметры протекания процесса пластической деформации металла, изменения микроструктуры материала детали и распределения деформаций по объему заготовки. В начальный момент нагружения заготовки давлением импульсного магнитного поля возникают электромеханические силы, характер которых определяется параметрами разрядной цепи «оборудование – инструмент – заготовка». Воздействие индуцированного высокочастотного тока на материал заготовки вызывает в поверхностном слое термоупругие напряжения, характер изменения которых представлен на рис. 1 [1].

Тепловая волна, распространяющаяся по объему деформируемого материала, одновременно повышает пластические характеристики металла и активное сопротивление разрядного контура. Последнее приводит к уменьшению коэффициента полезного действия процесса и сокращению времени деформацион-

ного воздействия импульсного магнитного поля на заготовку. Электромагнитная волна, проникая через материал, в определенном диапазоне воздействия, приводит к уменьшению дефектов структуры и также к повышению пластичности.

Соударение заготовки с жесткой формообразующей оснасткой, вызывает появление на границе раздела в обоих материалах, упругих и пластических волн сжатия. Пластические волны вызывают пластическое деформирование материала заготовки и появления остаточных напряжений, на что расходуется большая часть ее кинетической энергии. Упругая волна сжатия в заготовке проходит до ее свободной поверхности и отражается упругой волной растяжения. Поскольку скорость движения пластической волны значительно ниже, упругая волна в материале накладывается на пластическую и снижает напряжения в ней, прекращая дальнейшее пластическое деформирование заготовки.



**Рис. 1.** Термоупругие напряжения в материале заготовки в зависимости от времени  $t$ , в периодах тока разряда  $T$

Повышение эффективности процессов магнитно-импульсной штамповки и улучшение эксплуатационных характеристик получаемых деталей возможно за счет управления и оптимизации параметров воздействующих факторов на заготовку. При выполнении поставленной задачи были проведены исследования практически одновременно протекающих процессов, сопутствующих деформационному, и проведен анализ их взаимного влияния на точностные и эксплуатационные характеристики заготовки.

В процессе деформирования заготовки определены следующие условно выделенные этапы:

- стадия интенсивного нагружения заготовки давлением импульсного магнитного поля и возникновения максимальных термоупругих напряжений на поверхности заготовки от индуцированного тока;
- стадия движения заготовки под действием кинетической энергии и прохождения тепловых и электромагнитных волн по объему материала заготовки;
- стадия удара заготовки о технологическую оснастку с наложением волновых эффектов при соударении;
- стадия разгрузки и формирования остаточных напряжений в объеме заготовки;
- стадия отскока заготовки от матрицы описываемая уравнением колебательного затухающего движения.

Расчет распределения токов и магнитного давления на поверхности заготовки для первой стадии проводится несколькими методами, например, с помощью векторного потенциала [2]. Однако, с учетом магнитной проницаемости материала заготовки полное решение интегродифференциальных уравнений в частных производных является сложным даже численными методами. В предположении, что заготовка неподвижна, плотность электромагнитных сил, при определении полной силы, можно найти из выражения [2]

$$F = \frac{I^2}{2} \frac{\partial L_u}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $I$  – ток разряда,  $x$  – зазор между индуктором и заготовкой,  $L$  – индуктивность рабоче-

го инструмента,  $M$  – взаимная индуктивность индуктора и заготовки.

При расчете нагрева заготовки импульсом вихревого тока, вследствие его кратковременности, процесс можно считать адиабатическим. Количество тепла, выделенного в скин-слое (эффективном сечении) заготовки за время  $dt$  будет определяться следующей зависимостью:

$$dQ = \frac{\rho l}{S_{эф}} \cdot I^2 dt, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное электросопротивление материала заготовки,  $S_{эф}$  – эффективное сечение,  $l$  – длина токового слоя заготовки,  $t$  – время воздействия.

На второй стадии с учетом движения заготовки и электромагнитной волны в материале, определяющие уравнения могут быть представлены в следующем виде [3]

$$\begin{aligned} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 U_E}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 U_E}{\partial r^2} &= -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial B^2}{\partial x} \\ (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 U_E}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 U_E}{\partial r^2} &= (3\mu + 2\mu)\alpha \frac{\partial T_1}{\partial x} \\ \chi \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \rho c_v \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{1}{\sigma \mu_0} \left( \frac{\partial B}{\partial x} \right)^2 \\ (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 U_0}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 U_0}{\partial r^2} &= (3\mu + 2\mu)\alpha \frac{\partial T_2}{\partial x} \\ \chi \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} - \rho c_v \frac{\partial T_2}{\partial t} - (3\mu + 2\mu)\alpha T_0 \frac{\partial^2 U_0}{\partial x \partial x} &= (3\mu + 2\mu)\alpha T_0 \left[ \frac{\partial^2 U_B}{\partial x \partial x} + \frac{\partial^2 U_T}{\partial x \partial t} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U_B$  – перемещение в электромагнитной волне,  $\lambda, \mu$  – упругие постоянные Ламе,  $U_T$  – перемещение в термоупругой волне,  $\rho$  – плотность,  $x$  – координата,  $t$  – время,  $C_v$  – удельная теплоемкость,  $T$  – температура,  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения.

Выражение (3) описывает движение электромагнитной волны по объему заготовки. Выражение (4) описывает несвязанную тепловую волну  $T_1$ , обусловленную Джоулевым нагревом, где  $U_T$  – перемещение в термоупругой волне.

В уравнение (5) вошли поправки физического процесса, связанные с действием одновременного возмущения от тепловой волны и электромагнитной, в начальный момент времени.

Решение для магнитной индукции дает исходную информацию для определения температуры.

В общем случае температурное поле должно удовлетворять условиям конвекции. Однако в качестве допущений принимаем, что конвекция на поверхности заготовки принята равной нулю.

Решение неоднородного уравнения, описывающего распределение температуры можно найти в следующем виде:

$$T(x, t) = \frac{\alpha}{\pi(1-2\alpha)^{1/2}} \int_{2\alpha}^1 \frac{\exp\left[\frac{-x^2}{4\alpha t} h\right]}{\eta(1-\eta)^{1/2}} d\eta, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – безразмерный параметр  $\alpha = \frac{\sigma\mu_0\lambda}{\rho C_v}$ ,  $\lambda$

– теплопроводность,  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость,  $\eta$  – безразмерный параметр

$$\eta = \frac{2\epsilon t(1-2\alpha)}{\tau^{1/2}}.$$

Температура на поверхности заготовки  $x=0$  принимается постоянной, не зависящей от времени

$$T_s = \frac{\alpha}{\pi(1-2\alpha)^{1/2}} \lambda n \frac{1+(1-2\alpha)^{1/2}}{1-(1-2\alpha)^{1/2}}. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет пересчитать значение температуры в зависимости от величины магнитной индукции. Так например для алюминия  $T_s = 0,62 K$  при  $B_0 = 1Bб/м^2$ , для меди  $T_s = 0,40 K$  при  $B_0 = 1Bб/м^2$ .

Это приближение позволяет считать, что температура мгновенно повышается до значения  $T_s$ , при воздействии ИМП, а затем поддерживается равной  $T = T_s$  за счет тепла вызываемого рассеивающимся магнитным полем. Данное предположение подтверждается проведенными экспериментами.

Температурные волны, возбуждаемые Джоулевым нагревом вызывает ожидаемый

скачек напряжения, связанный со скачком температуры на границе. Однако, в случае резкого повышения температуры на границе этот скачок при учете потерь на конвекцию превращается в плавный переходный процесс. В начале термические напряжения являются сжимающими, после отражения от границы появляются растягивающие напряжения.

Теоретическое исследование связанное с изучением эффекта пластичности можно разделить на два типа работ основанных на принципиально различных физических механизмах: “электронного ветра” и “электростимуляции”. В них увеличение пластичности определяется импульсом электромагнитного поля, а определяющим параметром является вектор  $\vec{J}$ . При этом амплитуда вектора плотности электрического тока велика  $|\vec{J}| < 10^9 A/м$ , а время мало ( $\tau \sim 10^{-4} сек$ ).

В работах второго типа определяющим параметром является скаляр  $j^2$  и его распределение в зоне деформации, время при этом не существенно. При этом плотность электрического тока  $|\vec{J}| < 10^9 A/м^2$ .

Феноменологический закон деформирования заготовки под действием эффекта пластичности от воздействия высокоэнергетического импульсного магнитного поля можно сформулировать с использованием следующих гипотез [3]:

$$d\sigma = (d\epsilon_0 + \alpha_0\theta)E - d\sigma, \quad \sigma > \sigma_0 \quad d\sigma > 0, \quad (8)$$

$$d\sigma = (d\epsilon_0 + \alpha_0\theta)E \cdot E \quad \sigma > \sigma_0 \quad d\sigma > 0.$$

Здесь  $\epsilon_0$  - упругая деформация;  $\alpha$ ,  $E$ ,  $\sigma_0$  – соответственно коэффициент линейного термического расширения, модуль упругости и предел текучести;  $\theta$  - температура суммарного нагрева.

Приращение пластической составляющей напряжений определяется в следующем виде:

$$d\sigma_p = P(k)dW. \quad (9)$$

Здесь  $k$  - параметр структурного состояния материала, для которого записано кинетическое уравнение

$$dk = f_1(W_p, q)dW_p + f_2(W_p, q)dq, \quad k \geq 0, \quad (10)$$

где  $dW_p = \sigma d\epsilon$ , и функции  $P_0, f_1, f_2$  – задают

ся параметрами технологического процесса.

Уравнения (9) и (10) можно использовать как для одновременного, так и раздельного действия механического эффекта и энергетического воздействия.

В случае раздельного действия уравнения принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} d\sigma_p &= P(\kappa)dW_p, \\ \chi_0 &= \chi_0(W^0, q^0); \chi \geq 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где индекс 0 определяет состояние материала перед повторным нагружением

$$\beta_2^0 = \frac{W_p^0 - W_p^-}{q^0}, \quad (12)$$

$W_p^0$  и  $W_p^-$  - работа пластической деформации к моменту повторного нагружения и работа пластической деформации без воздействия ИМП. Для материалов с упрочнением близким к линейному функционал определяется как

$$R(\chi) = \frac{2m}{\sigma_0 \sqrt{1 + \frac{2m}{\sigma_0 \chi_0}}}. \quad (13)$$

Тогда закон деформирования (9) принимает следующий вид:

$$\sigma_p = \sigma_0 \sqrt{1 + \frac{2m}{\sigma_0^2} (\chi_0 + W_p)}; \quad \sigma > \sigma_0. \quad (14)$$

В случае одновременного действия соотношения для  $\sigma$  можно представить в виде

$$d\chi = dW_p - \beta_2 dq, \quad (15)$$

где константа  $\beta_2$  может определяться следующим образом:

$$\beta_2 = \frac{W_p^{(k)} - W_p^{(n)}}{q}.$$

$W_p^{(k)}$  и  $W_p^{(n)}$  - работа пластической деформации, соответствующая началу и концу процесса.

С учетом сказанного уравнение (14) примет вид:

$$\sigma_p = \sigma_0 \sqrt{1 + \frac{2m}{\sigma_0^2} (W_p - \beta_2 q)}, \quad (16)$$

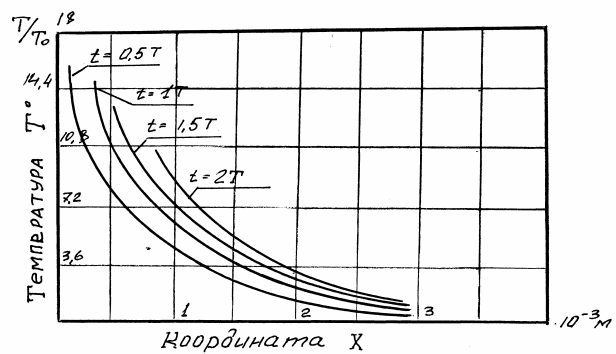


Рис. 2. Зависимость величины индукции магнитного поля от глубины проникновения в металл

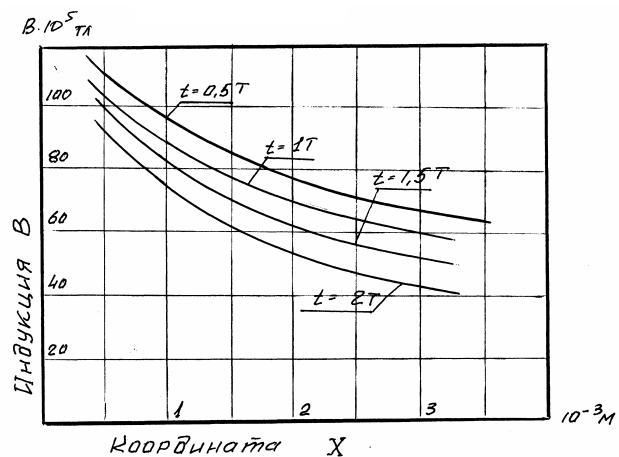


Рис. 3. Зависимость проникновения температурной волны в материал заготовки для различных моментов времени

где  $m$  - параметр упрочнения материала при пластической деформации.

Результаты численного моделирования процессов теплового и электромагнитного воздействий на материал заготовки приведены на рис. 2 и 3, где показано проникновение магнитного поля и температурного поля в металл заготовки в одинаковые промежутки времени  $\tau$ . Результаты расчета сделаны для алюминиевых сплавов.

На графиках рис. 2 и 3 время приведено

в безразмерных величинах  $\tau = \frac{\tau}{T_0}$ , где  $T_0$  - полупериод тока разряда в системе индуктор-заготовка.

Зависимости волн упругих напряжений, вызванных давлением вихревого тока, при проникновении магнитного поля в материал заготовки, приведены на рис. 4.

Волны, обусловленные произведением векторов тока  $\vec{j}$  и индукции магнитного поля

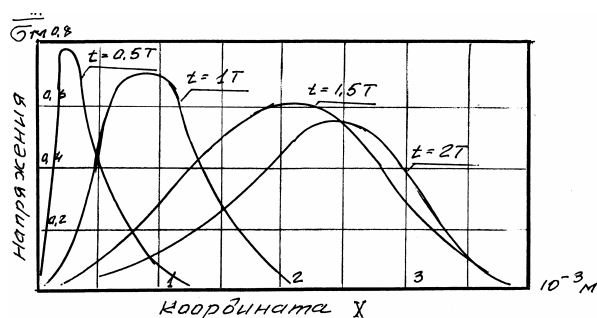


Рис. 4. Зависимость волны упругих напряжений от различных моментов времени

$\bar{B}$ , дают объемную силу  $\bar{I} \times \bar{B}$ , проникающую в металл со скоростью  $C$ . Напряжения ограничиваются величиной  $B_0^2/2\mu_0$ . Волны, обусловленные  $\bar{I} \times \bar{B}$  являются волнами сжатия.

Анализ результатов численных исследований показывает, что повышение температуры на поверхности заготовки от вихревого тока может вызвать напряжения больше, чем от магнитного давления –  $B_0^2/2\mu$ . Однако они затухают при проникновении термоупругой волны в материал заготовки. Волны, вызванные магнитным давлением, распространяются в твердых телах с малым затуханием.

Волновые эффекты, возникающие при ударе заготовки о технологическую оснастку приводят к напряжениям, которые определяются отношением динамических жесткостей материалов заготовки и матрицы и скоростью их соударения [4].

Для описания протекающих в деформируемых трубчатых заготовках механических процессов использован вариационный принцип Гамильтона-Остроградского, который в общем виде может быть описан следующим соотношением [1]:

$$\delta W_K = \delta W_n + \delta A_y + \delta A_s \quad (17)$$

где  $\delta W_K$ ,  $\delta W_n$ ,  $\delta A_y$ ,  $\delta A_s$  – вариации К-го состояния кинетической, потенциальной энергии, работы объёмных и поверхностных сил соответственно.

При решении нелинейной задачи механики деформируемой среды используем итерационный метод. Вариационное уравнение последовательно преобразуется в метрике  $K_i$

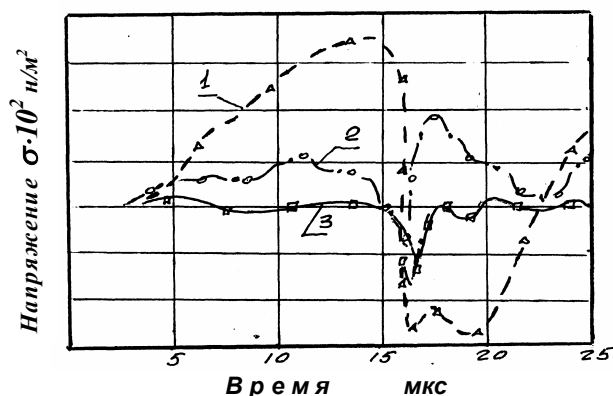


Рис. 5. Распределение текущих напряжений в начальный момент деформирования: 1 – радиальные, 2 – меридиальные, 3 – тангенциальные

состояния соответствующего положению среды на произвольной  $K_i$  итерации. Для этого используем соотношения между векторами различной ковариантности и правило преобразования оператора Гамильтона.

При численной реализации вариационного уравнения Гамильтона-Остроградского граничные условия задаются для фиксированного момента времени. Для записи граничных условий рассмотрены все стадии деформирования.

Для численных исследований используется метод конечных элементов.

При определении параметров напряжённо-деформированного состояния расчётной модели на временном шаге  $dt$  для каждого конечного элемента всех блокфрагментов последовательно вычисляются все характеристики деформируемой среды.

Метрические характеристики конечных элементов (КЭ) пересчитываются на каждом шаге, что в целом позволяет учесть геометрическую нелинейность задачи. Учет физической нелинейности производится путем корректировки на каждом шаге девиаторной части полных напряжений.

Решение в аналитическом виде приведенных задач влияния факторов импульсного магнитного поля на материал деформируемой заготовки является весьма сложным. Для достижения поставленной цели по разработке методов проектирования технологических процессов на формирование напряженно-деформированного состояния материала заготовки каждое воздействие моделировалось неза-

висимо от других. Интегральная характеристика получена наложением картин текущих и остаточных напряжений времени рис. 5.

Математическое моделирование технологий изготовления деталей давлением импульсного магнитного поля позволило выбрать оптимальные параметры технологических процессов и прогнозировать свойства изготавливаемых деталей и обосновать новые технические решения по дальнейшему расширению возможностей метода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самохвалов В.П., Кирилин А.Н., Паламарчук Ю.Е. Теоретические исследования деформационного и энергетического воздействия импульсного магнитного поля на материал заготовок // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2001. №3.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
3. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шатило Г.С. Влияние локального неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов // Изв. АН СССР. Металлы. 1984. №4.
4. Седов Л.И. Механика сплошных сред. М.: Наука, 1970.
1. Самохвалов В.П., Кирилин А.Н., Паламар-

### THE ANALYSIS OF YIELDING DEFORMING MATERIALS IS DEVELOPED BY MAGNETIC IMPULSE LOUD

© 2005 V.P. Samohvalov

Samara State Aerospace University

The analysis of methods mathematical model of the technological process dynamically deforming materials is developed by magnetic-impulse stamping. For calculation distribution problem mathematical physic account process development methods decisious on the customer's and calculation effective.