

А. А. Трещев, В. М. Леонов

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Тульский государственный университет, г. Тула

Аннотация. В статье рассмотрено исследование характеристик неосесимметричного металлического образца на операциях магнитно-импульсной обработки. Построено распределение характеристик для элементов в зоне активного нагружения в координатах времени и пространства.

Ключевые слова: контактная пара, втулка, прямолинейная трещина, коэффициенты интенсивности напряжений, предельно-равновесное состояние втулки.

УДК: 539.375

Анализ процессов формоизменения материалов на операциях магнитно-импульсной обработки материалов в данной статье производится на основе разработанной модели (реализующая программа Tetra Compound v.1.1, свидетельство № 2013610558). В основу модели положены соотношения Трещева А. А. [1], [2]. Построенная конечно-элементная модель позволяет производить детальный анализ всех параметров напряженно-деформированного состояния для любой выбранной области исходной заготовки (при расчете рассматривался сплав АМг2М). За единичный элемент принят тетраэдр. Рассмотрено формоизменение образца при длительности процесса более 25 мкс. для осевого и продольного сечения, а также сечения под углом 45° от оси заготовки в окрестности точек 1, 2, 3 (рис. 1а) на операции отбортовки бокового отверстия. Для более детального рассмотрения взяты 27 точек вдоль края отверстия, начиная от верхней точки отверстия до нижней (по оси заготовки). Расстояние выбранных точек от края отверстия составляет 5 мм (рис. 1б). Для расчета выбрана однослойная сетка конечных элементов в форме тетраэдра (24 тетраэдра образуют единичный прямоугольный параллелепипед) с четырьмя узлами регулярной равномерной решетки, каждый узел обладает шестью степенями свободы в 3 D постановке для решаемой задачи, число слов для рассматриваемой принципиальной схемы ограничено лишь вычислительными ресурсами компьютера. Рассмотрение протекающих процессов формоизменения материала на операции отбортовки бокового отверстия предполагает с учетом возможного масштабирования в дальнейшем широкий спектр возможных решений, направленных на оптимизацию существующих и разработку новых технологий с учетом фактора замещения импортной продукции.

Распространение упругопластических деформаций в объеме материала зависит от формы внешнего импульса и конфигурации деформируемого материала (рис. 2). Для предварительного рассмотрения были выбраны точки на краю отверстия, в зоне наиболее интенсивного формоизменения – в осевом сечении, в поперечном сечении и на краю отверстия, под углом 45° к вертикальной оси, как показано на рис. 1а. Соответствующие диаграммы напряжений показаны на рис. 2. Серьезные различия в пластической зоне для каждой из точек на

диаграмме нагружения позволяют сделать вывод о различном вкладе сдвиговых компонент тензоров в общую работу по формоизменению [3].

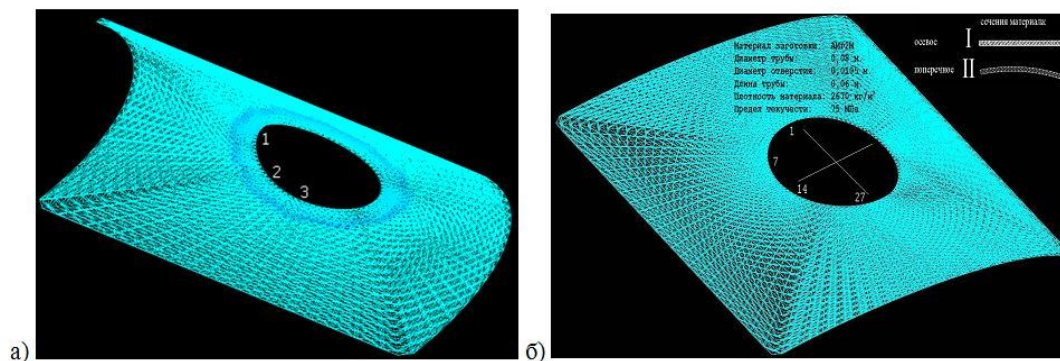


Рис. 1 а, б. Расчетная модель трубчатой заготовки с боковым отверстием

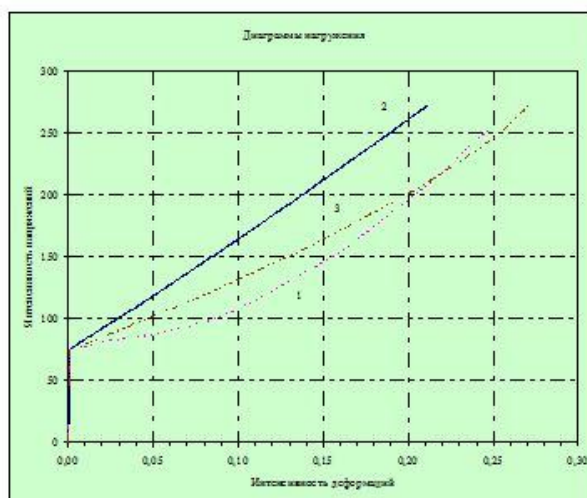


Рис. 2. Диаграммы зависимости интенсивности напряжений (МПа) от деформаций

Взаимосвязь между компонентами тензоров напряжений и деформаций описывается на основе формул Кастильяно зависимостью (1):

$$e_{ij} = \frac{\partial W_k}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (1)$$

Потенциал W в этом случае представляется в виде суммы (2)

$$W = \hat{W} + \tilde{W}, \quad (2)$$

где \hat{W} содержит слагаемые, приводящие к линейным соотношениям, \tilde{W} — составляющая потенциала, приводящая к нелинейным соотношениям между напряжениями и деформациями.

Выражение для потенциала деформаций имеет вид [1], [2]:

$$W = (A_e + B_e \xi) \sigma^2 + (C_e + D_e \xi + E_e \eta \cos 3\varphi) \tau^2 + [(A_p + B_p \xi) \sigma^2 + (C_p + D_p \xi + E_p \eta \cos 3\varphi) \tau^2]^n,$$

где $A_e, B_e, C_e, D_e, E_e, A_p, B_p, C_p, D_p, E_p$ — выражения, зависящие от констант квазилинейной и пелишейпой частей потенциала соответственно.

Применение формул Кастильяно к потенциалу позволяет получить следующие соотношения (3):

$$[W_{ii}] = \frac{\partial[W_1]}{\partial\sigma_{ii}}, \quad 2[W_{ij}] = \frac{\partial[W_1]}{\partial\tau_{ij}}, \quad (i \neq j). \quad (3)$$

Дальнейшие преобразования приведут к следующему результату (4):

$$\frac{\partial[W_1]}{\partial\sigma_{ii}} = \begin{bmatrix} 2\sigma/3 \\ 2(\sigma_{ii} - \sigma)/3 \\ \sigma\xi - \xi^3\sigma_{ii}/3 \\ 2\xi(\sigma_{ii} - \sigma)/3 + \eta(\tau - \eta\xi\sigma_{ii})/3 \\ \eta \cos 3\varphi[(\sigma_{ii} - \sigma)(2 + \xi^2) - \tau\eta\xi]/3 + \tau^2 \partial \cos 3\varphi / \partial\sigma_{ii} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial[W_1]}{\partial\tau_{ij}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 4\tau_{ij}/3 \\ -2\xi^3\tau_{ij}/3 \\ 2\xi\tau_{ij}(2 - \eta^2)/3 \\ 2\eta\tau_{ij} \cos 3\varphi(2 + \xi^2)/3 + \tau^2\eta \cdot (\partial \cos 3\varphi / \partial\tau_{ij}) \end{bmatrix},$$

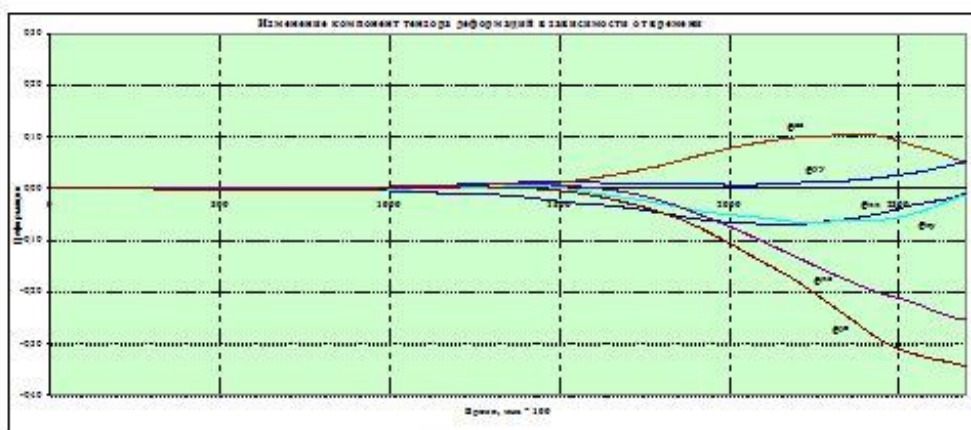
где σ_{ij}, τ_{ij} — компоненты тензора напряжений; $\xi, \eta, \cos 3\varphi$ — нормированные напряжения и фазовый инвариант соответственно; σ, τ — октаэдрическое нормальное и касательное напряжения.

Различие в диаграмме напряжений для выбранных точек позволяет сделать вывод о различном соотношении нормальных и касательных напряжений и необходимости более детального анализа компонент тензоров напряжений и деформаций, а также взаимосвязанных значений накопленной работы по формоизменению материала. Для верхней точки в осевом сечении сдвиговые деформации преобладают над нормальными, последние являются преобладающими в крайней точке поперечного сечения (рис. 3в) заготовки.

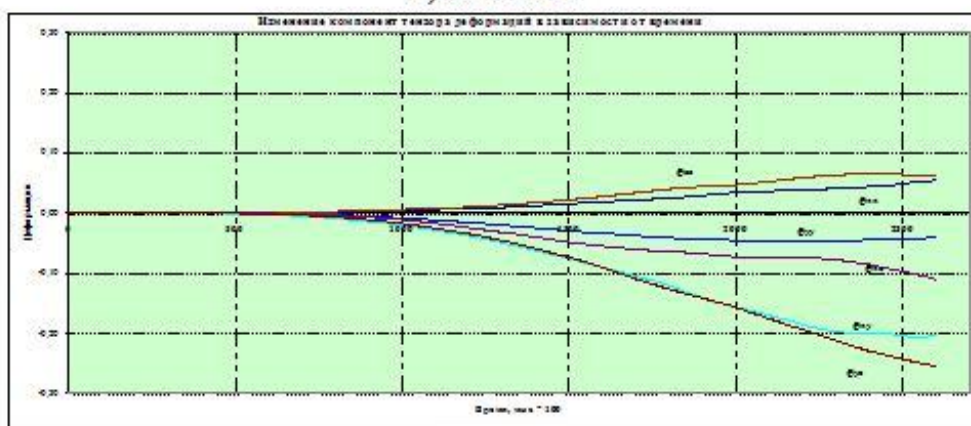
По приведенным данным можно отметить, что элементы окрестности точки 3 испытывают значимые сдвиговые деформации помимо деформации в радиальном направлении. Для более детального анализа упругопластических переходов в материале на крае отверстия произведено построение пространственно-временных диаграмм для компонент тензора деформаций и результирующих характеристик на основе расчетных данных (рис. 4а – ж).

Построение поля пространственно-временного распределения для каждой из характеристик и последующий анализ диаграмм на рис. 4 позволяют оценить характер пространственно-временного распределения параметров, их вклад в общем объеме при формоизменении. Компонента тензора деформаций e_{11} носит знакопеременный характер, что обусловлено сложной геометрией изделия, при этом отрицательная величина свидетельствует о локальном сжатии для большей части элементов близлежащими для большей части образующей отверстия. Осевая компонента тензора минимальна в поперечном сечении отверстия, увеличение происходит с приближением к осевому сечению заготовки. Изменение радиуса кривизны деформируемого материала от значения внутреннего радиуса оболочки для поперечного сечения (точка 3 – рис. 1а и точка 14 – рис. 1б) до $+\infty$ в осевом сечении образца (точка 1) обуславливает приведенные на рис. 4 изменения компонент тензора деформаций.

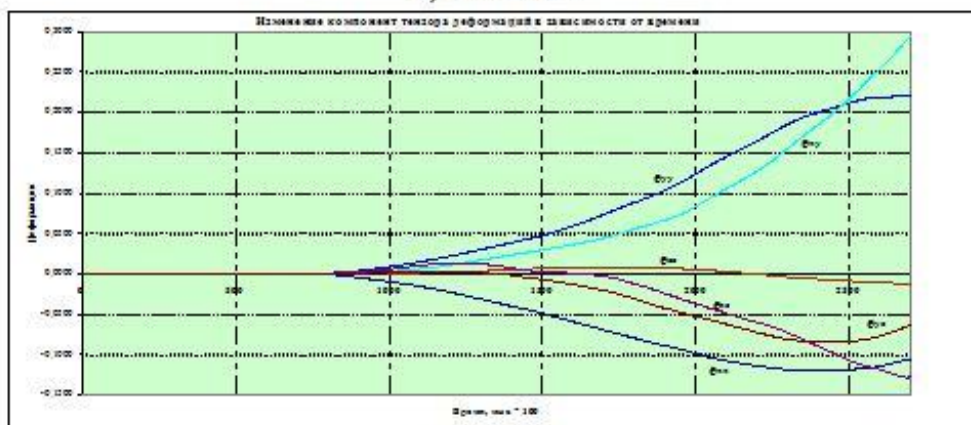
Стоит отметить снижение практически до нулевого значения осевой компоненты тензора для элементов в зоне поперечного сечения, где интенсивность деформаций будет обусловлена величиной компоненты ϵ_{12} .



а) точка № 1



б) точка № 2



в) точка № 3

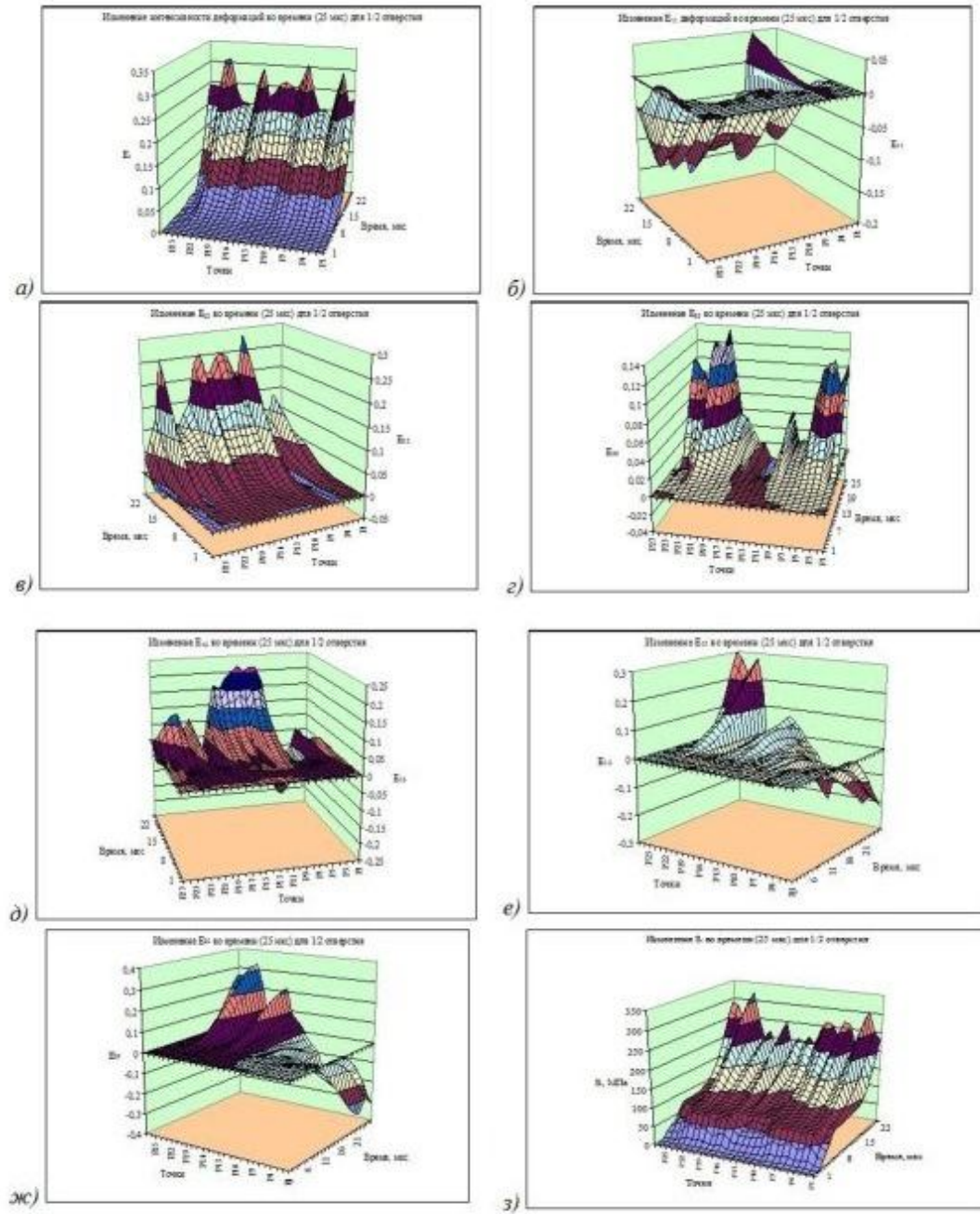


Рис. 4. Распределение характеристик для 1/2 отверстия по высоте (5 мм от края)

В значительной степени сдвиговые компоненты являются знакопеременными по длине образующей, что свидетельствует о повороте материальных волокон по отношению к близлежащим элементам. Для деформаций ε_{13} и ε_{23} наблюдается изменение знака при переходе от точки 1 к точке 27 с переходом через нулевое значение в окрестности точки 14 (рис. 1б), что свидетельствует о разнонаправленном исходном расположении материальных волокон.

В ходе ранее проведенных исследований было установлено, что при значении относительного диаметра отверстия $d / D = 0.14$ с ростом частоты от 8 до 20 кГц уменьшение напряжений составляет 15 %, а для $d / D = 0.4$ – 22 %. Минимальное значение напряжений в точке 1 имеем при значении $d / D = 0.31$. Минимум напряжений в данном случае обусловлен соотношением диаметров заготовки и отверстия. Значения интенсивности напряжений в точке 1 (на крае отверстия в осевом сечении) превышают аналогичный показатель в точке 3 (вблизи матрицы) в среднем в 1.6 раза, в данной окрестности происходит растяжение и утончение материала, что подтверждается экспериментальными данными [3].

На крае отверстия напряжения снижаются при переходе от начального к конечному сечению. Величины напряжений на крае отверстия в осевом сечении превышают аналогичный показатель на крае отверстия в поперечном сечении в 1.8 раза. Напряжения в окрестности точки 1 в 1.6 раза больше напряжений в основании отверстия, в окрестности точки 3. Напряжения в основании отверстия в поперечном сечении заготовки больше напряжений на крае в 1.15 раза.

Окружные деформации в сечении 1 снижаются с 0.31 на крае до 0 в основании отверстия. Наблюдаем постепенное снижение окружных деформаций с 0.31 до 0.08, а также с 0.14 до 0.05 при смене сечения с 1 по 14. В основании отверстия окружные деформации достигают наибольшего значения -0.13 в 7 сечении, для остальных сечений в основании окружные деформации приближаются к нулю.

Проведенные расчеты позволили установить характер изменения описанных характеристик во взаимосвязи с параметрами внешнего воздействия, дальнейшее исследование позволит формализовать выявленные зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Трещев, А. А.* Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения: монография. – Тула : РААСН, 2008. – 264 с.

[2] *Трещев, А. А.* Исследование устойчивости тонких цилиндрических оболочек, выполненных из дилатирующих материалов // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 1. С. 14–19.

[3] *Чибисов, В. П.* Исследование процесса деформации концевой части осесимметричных трубчатых заготовок из анизотропного материала импульсным магнитным полем - дисс. на соиск. : канд. техн. наук. – Тула : ТулПИ. – 1981.

Трещев Александр Анатольевич,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет, г. Тула

e-mail: taa58@yandex.ru

Леонов Василий Михайлович,

кандидат технических наук, доцент кафедры строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет, г. Тула

A. A. Treshchev, V. M. Leonov

MAGNETIC PULSE TREATMENT OF METALS - FEATURES INVESTGATION

Tula State University, Tula

Abstract. The Article contains features review of non-axial metal specimen on magnetic-pulse treatment operations. 3-Dimension curves has been obtained for the elements under pressure.

Keywords: isotropic strip, non-uniformly heating, crack, end zones, plastic deformations, contact stresses.

REFERENCES

[1] *Treshchev, A. A.* Theory of deformation and durability of the materials sensitive to a type of a tension. The defining ratios: monograph / A. A. Treshchev. – Tula : RAASN, 2008. – 264 p. (in Russian)

[2] *Treshchev, A. A.* Research of stability of thin cylindrical covers, the materials executed from the dilatiruyushchikh / A. A. Treshchev // News of higher education institutions. Construction. – 1999. – № 1. – P. 14–19. (in Russian)

[3] *Chibisov, V. P.* Research of process of deformation of trailer part axisymmetric tubular preparations from anisotropic material the pulse magnetic field - the thesis on competition : phd. – Tula : TPI. – 1981. (in Russian)

Treshchev, Alexander Anatolyevich

Dr. Tech. Sci., Professor, Head of the Department of Construction, Construction Materials and Designs, Tula State University, Tula

Leonov, Vasilii Mihailovich

PhD, Assoc. Professor, Department of Construction, Construction Materials and Designs, Tula State University, Tula