

УДК 621.7.044.7

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ДИФФУЗИИ И КУМУЛЯЦИИ ПОЛЯ НА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ОБЖИМ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА

© 2025 В.Н. Самохвалов¹, Д.Г. Черников^{1,3}, Ж.В. Самохвалова², Н.В. Самохвалов¹, Р.Ю. Юсупов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

²Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Россия

³Самарский федеральный исследовательский центр РАН, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 10.04.2025

Рассмотрены особенности обжатия трубчатых заготовок давлением импульсного магнитного поля в условиях слабого скин-эффекта и проявления эффекта магнитной кумуляции. Показано увеличение напряженности на внутренней стенке трубчатой заготовки малого диаметра относительно случая плоской волны магнитного поля и возникновение значительной кумуляции просочившегося магнитного поля при свободном обжатии труб малого диаметра, препятствующей их деформации. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса магнитно-импульсного пережатия трубчатых элементов малого диаметра. Показана необходимость учета влияния и минимизации эффекта кумуляции магнитного поля. Кумуляция просочившегося внутрь трубчатой оболочки импульсного магнитного поля не позволяет обеспечивать смыкание стенок труб в операциях магнитно-импульсного пережатия труб малого диаметра.

Ключевые слова: Импульсное магнитное поле, трубчатая заготовка, обжим, диффузия магнитного поля, магнитная кумуляция.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-116-123

EDN: HQKMUY

ВВЕДЕНИЕ

При магнитно-импульсных методах обработки материалов поле, возбуждаемое импульсным током в индукторе, диффундирует в материал электропроводной заготовки, индуцируя в нем вихревые токи, магнитное поле которых противодействует внешнему магнитному полю. Распределение плотности вихревых токов по глубине и соответствующая этому напряженность просочившегося импульсного магнитного поля (ИМП) в стенке заготовки зависит от электропроводности обрабатываемого материала и частоты импульсного тока в индукторе. Как условно принятый геометрический параметр проникновения импульсного магнитного поля в глубину электропроводного материала используется понятие скин-слоя Δ . Это толщина электропроводного материала на которой плотность наведенных вихревых токов, и соответственно напряженность просочившегося переменного магнитного поля уменьшается в e раз (для случая плоской волны):

$$\Delta = \left(\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \sigma} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где f – рабочая частота импульсного тока, протекающего по индуктору, μ_0 – магнитная постоянная, σ – электрическая проводимость материала обрабатываемой заготовки.

Амплитудные значения импульса давления ИМП при обжатии трубчатых заготовок определяется разностью квадратов напряженности ИМП с внешней и внутренней стенки заготовки [1]:

$$P = 0,5 \mu_0 (H_0^2 - H_1^2), \quad (2)$$

Самохвалов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: samokhvalov.vn@ssau.ru

Черников Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева, старший научный сотрудник отдела металлофизики и авиационных материалов Самарского федерального исследовательского центра РАН. E-mail: chernikov.dg@ssau.ru

Самохвалова Жанна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагонное хозяйство и наземные транспортные комплексы». E-mail: j.samohvalova@samgups.ru

Самохвалов Николай Владимирович, лаборант-исследователь лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования. E-mail: samokhvalov.nv@ssau.ru

Юсупов Ринат Юнусович, научный сотрудник лаборатории прогрессивных технологических процессов пластического деформирования. E-mail: vvz@ssau.ru

где H_0 – напряженность ИМП на поверхности заготовки со стороны индуктора, H_1 – напряженность ИМП на противоположной стороне стенки заготовки.

Как следствие, диффузия магнитного поля сквозь толщину стенки заготовки снижает деформирующее действие ИМП, что необходимо учитывать при расчете энергозатрат на магнитно-импульсное формообразование и калибровку тонкостенных заготовок [2, 3].

При магнитно-импульсном воздействии на заготовки, выполненные из материалов с низкой электропроводностью (стали, титановые сплавы и т.п.), глубина скин-слоя значительно превышает толщину стенки заготовки. В этом случае для повышения интенсивности магнитно-импульсного воздействия целесообразно применение технологических спутников – прослоек из металлов с высокой электрической проводимостью (медь, алюминий), экранирующих магнитное поле до его входа в материал обрабатываемой заготовки [4].

В операциях магнитно-импульсной формовки и калибровки тонколистовых заготовок, даже выполненных из материалов с высокой электропроводностью, ИМП частично просачивается через стенку заготовки. При использовании металлической технологической оснастки, в этом случае, магнитное поле сжимается в зазоре между заготовкой и электропроводной оснасткой. Проявляется эффект называемый «магнитной подушкой», который затрудняет формовку или калибровку заготовок [1].

При больших степенях магнитно-импульсном обжати тонкостенных труб малого диаметра, диффузия магнитного поля в ее внутреннюю полость, даже при отсутствии внутри оправок из электропроводного материала, приводит к сжатию просочившегося ИМП в процессе высокоскоростного уменьшения внутреннего сечения трубы. Это приводит к возникновению дополнительных силовых эффектов затрудняющих деформационный процесс.

Целью работы является анализ величины противодавления, возникающего при магнитно-импульсном обжатии труб малого диаметра, выполненных из материалов с высокой электропроводностью, в случае большой степени диффузии ИМП и технологических методов его снижения.

ДИФФУЗИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОМ ОБЖИМЕ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА

При магнитно-импульсном обжатии цилиндрической (трубчатой) оболочки по мере проникновения волны электромагнитного поля от поверхности к оси происходит концентрация энергии просочившегося магнитного поля из-за уменьшения радиуса волны. Вследствие этой концентрации, ослабление поля в e раз происходит в трубчатой оболочке на глубине Δ_r несколько большей величины скин-слоя Δ , полученной по формуле (1) для случая плоской волны [5]. Здесь Δ_r – глубина скин-слоя в цилиндрической (трубчатой) заготовке с учетом концентрации энергии просочившегося магнитного поля из-за уменьшения радиуса волны.

Для оболочек большого радиуса R , когда $\Delta \ll R$, различие величин Δ_r и Δ практически несущественно. Но при магнитно импульсном обжиме труб малого диаметра, при условии что толщина стенки трубы h меньше или близка к Δ_r , это необходимо учитывать, поскольку происходит дополнительный интенсивный рост напряженности просочившегося поля.

В работе [6] получены формулы для вычисления амплитудной величины напряженности ИМП, проникшего через электропроводный материал тонкостенной заготовки, но только в начальный и конечный моменты процесса раздачи трубчатой металлической заготовки по форме внешней проводящей матрицы. Это позволяет учесть возможность появления эффекта «магнитной подушки», но только для случая раздачи давлением ИМП полых оболочек в электропроводную матрицу.

Для анализа электрофизических процессов при обжатии трубчатых заготовок давлением ИМП с отсутствием внутри их электропроводных оправок можно использовать результаты расчетов для случая просачивания поля внутрь цилиндрической трубчатой заготовки. В работе [7] для случая слабого скин-эффекта получена зависимость для величины амплитуды напряженности магнитного поля, просочившегося внутрь трубчатой оболочки H_1 , от амплитудного значения напряженности ИМП со стороны индуктора H_0 :

$$H_1 = H_0 \left(1 + i \frac{hR}{\Delta^2} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где h – толщина стенки трубчатой оболочки, R – радиус цилиндрической оболочки, i – мнимая единица.

Из формулы (3) следует, что напряженность просочившегося внутрь трубчатой заготовки ИМП зависит не только от отношения толщины стенки трубы к толщине скин-слоя в ее материале h/Δ , но также и от величины отношения ее радиуса к фактической толщине скин-слоя R/Δ .

Как следствие, при обжатии давлением ИМП трубчатых оболочек малого диаметра напряженность противодействующего деформированию просочившегося поля возрастает по сравнению с трубчатыми оболочками большого диаметра, даже при равной толщине их стенки и величине скин-слоя в материале.

При этом, из полученной зависимости (3) также следует, что связь напряженности ИМП внутри трубы с напряженностью ИМП со стороны индуктора является комплексной величиной. Практически это означает, что максимумы амплитудных значений ИМП внутри и вне трубы имеют сдвиг по времени. Максимум напряженности ИМП внутри трубы запаздывает относительно максимума напряженности ИМП со стороны индуктора, что обусловлено задержкой проникновения волны электромагнитного поля в материале стенки трубчатой оболочки. На глубине скин-слоя максимум напряженности просочившегося магнитного поля отстает на $\pi/2$ относительно внешнего поля [5]. Поэтому, если процесс обжима трубчатой заготовки завершается после первой четверти периода разрядного тока в индукторе (после прохождения максимума первой полуволны давления ИМП), то напряженность ИМП внутри трубы может быть больше чем снаружи. Это будет препятствовать процессу обжатия трубчатой заготовки.

КУМУЛЯЦИЯ ПОЛЯ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОМ ОБЖИМЕ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Но еще большую проблему при магнитно-импульсном обжиге и особенно при пережатии сечения труб малого диаметра может составлять проявление эффекта высокоскоростного сжатия просочившегося во внутреннюю полость трубчатой заготовки ИМП. В экспериментальной физике используется метод получения сверхсильных магнитных полей путем сжатия предварительно наведенного осевого магнитного потока электропроводной цилиндрической оболочкой – магнитная кумуляция. Это реализуется как при взрывном [8], так и при магнитно-импульсном обжатии трубчатой оболочки [9]. При высокоскоростном сжатии отдельно наведенного магнитного потока в полости трубчатой оболочки, во внутреннем скин-слое (во внутреннем слое материала оболочки) возбуждается дополнительный вихревой ток. Он не только поддерживает, но и многократно усиливает напряженность магнитного поля во внутренней полости трубчатой оболочки. Взаимодействие наведенного тока с магнитным полем внутри оболочки, напряженностью $H_{\text{МК}}$, приводит к возникновению в ее материале объемных сил электромагнитного давления $P_{\text{МК}}$ [7]:

$$P_{\text{МК}} = (H_{\text{МК}})^2 / (8\pi),$$

направленных от оси, т.е. противодействующих его обжатию, а также к дополнительному омическому нагреву его материала.

В идеальных условиях при магнитной кумуляции магнитный поток внутри полости трубчатой оболочки остается постоянным. В этом случае, в процессе обжатия оболочки за счет уменьшения площади поперечного сечения внутренней полости от S_0 до S_1 происходит увеличение магнитной энергии и рост напряженности поля $H_{\text{МК}}$ относительно первоначального значения напряженности наведенного магнитного поля H_1 на величину β пропорциональную изменению площади внутренней полости:

$$\beta = H_{\text{МК}} / H_1 = S_0 / S_1.$$

В рассматриваемом процессе высокоскоростного магнитно-импульсного обжатия труб малого диаметра, плотность энергии просочившегося через стенку заготовки магнитного поля H_1 , с учетом возникновения магнитной кумуляции также будет определять величину внутреннего противодействия $P_{\text{МК}}$. Оно будет интенсивно противодействовать процессу их высокоскоростного обжатия давлением ИМП со стороны индуктора. При обжатии внутренней поверхности трубчатой оболочки до некоторой предельной величины площади поперечного сечения, магнитное поле во внутреннем объеме оболочки может достигать аномально высоких значений [3].

С учетом вышесказанного и формул (2) и (3), текущее результирующее амплитудное значение величины давления ИМП в процессе обжатия трубчатой заготовки малого диаметра определяется выражением:

$$P \approx \frac{\mu_0}{2} H_0^2 \left(1 - \frac{\beta_K}{(1 - ihR / \Delta_T^2)} \right),$$

где β_K – текущее значение коэффициента усиления напряженности просочившегося магнитного поля, вследствие магнитной кумуляции из-за уменьшения площади поперечного сечения трубы в процессе ее высокоскоростного деформирования.

Выше описанные явления: интенсификация просачивания (диффузии) магнитного поля при малых диаметрах трубчатых заготовок, его сдвиг по фазе и возникновение магнитной кумуляции, создают интенсивное противодействие, затрудняющее процесс высокоскоростного магнитно-им-

пульсного деформирования на обжим труб малого диаметра, выполненных даже из материалов с высокой электропроводностью.

Это эффект наиболее интенсивно может проявляться при свободном магнитно-импульсном обжатии трубчатой оболочки малого диаметра. При малых значениях внутреннего радиуса полости оболочки большое противодавление может остановить ее обжатие от действия внешнего давления ИМП, например, в операциях магнитно-импульсного пережатия сечения трубопровода, когда необходимо обеспечить его герметичность.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КУМУЛЯЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС МАГНИТНО ИМПУЛЬСНОГО ОБЖАТИЯ ТРУБОПРОВОДОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Исследование технологических возможностей магнитно-импульсного обжима труб малого диаметра при кумуляции просочившегося импульсного магнитного поля производилось применительно к процессу пережатия поперечного сечения трубопроводов. Магнитно-импульсное пережатие производилось на образцах, выполненных из сплава АД31Т, длиной 40 и 60 мм, наружным диаметром в зоне обжатия 6 мм и диаметром отверстия 3,3 мм (образец-имитатор заправочного штуцера тепловой трубы космического аппарата).

Эксперименты по пережатию опытных образцов производились на магнитно-импульсной установке МИУ-50 ($C=252,8$ мкФ, $L_0=0,11$ мкГн, $f_{кз}=30,2$ кГц, $U_{max}=20$ кВ). Измерения рабочей частоты разрядного тока выполнялось с применением пояса Роговского.

Использовалась оснастка на базе многовиткового индуктора с концентратором магнитного поля (рис. 1) и одновиткового индуктора, выполненного из стали 40Х (рис. 2).

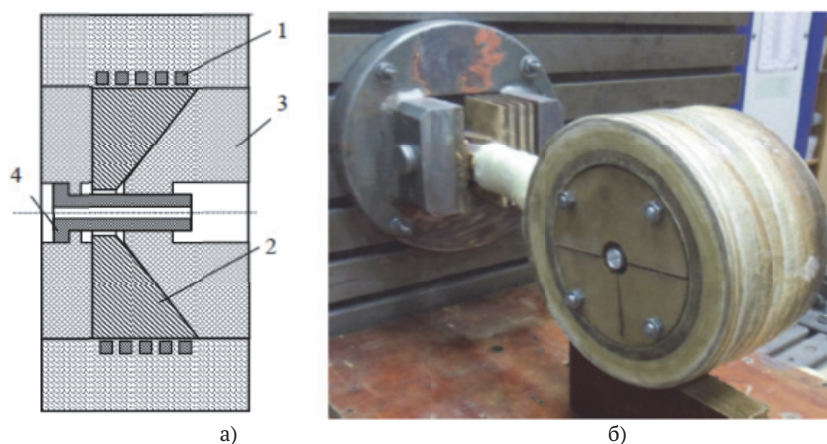


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и внешний вид оснастки на базе многовиткового индуктора с концентратором магнитного поля (б):

1 – многовитковый индуктор, 2 – концентратор магнитного поля, 3 – центрирующая вставка, 4 – трубчатый образец

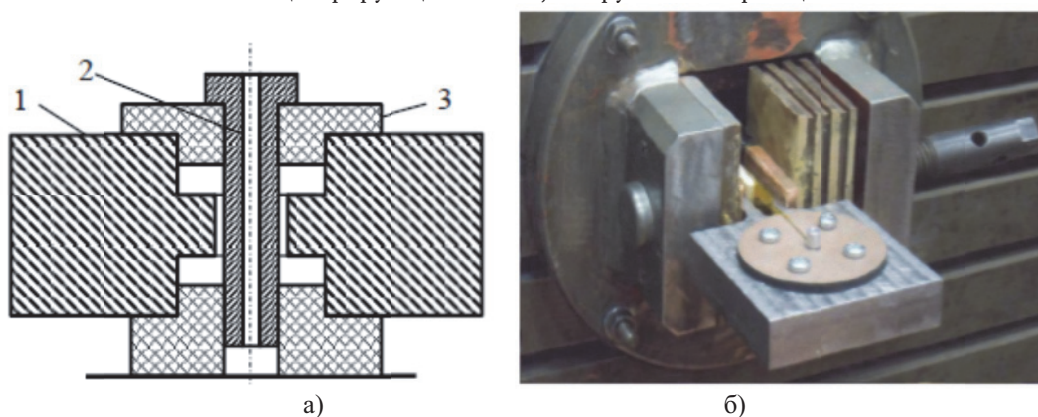


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и внешний вид оснастки с одновитковым индуктором (б):

1 – одновитковый индуктор, 2 – трубчатый образец, 3 – центрирующий фланец

Применение различных инструментов для магнитно-импульсного обжима позволило изменять рабочую частоту разрядного тока, за счет различной индуктивности системы на базе многовиткового и одновиткового индуктора, при одинаковом диаметре и ширине рабочей зоны обоих устройств.

Диаметр рабочего отверстия (по главной изоляции) многovitкового индуктора 1 (рис. 2,а) составлял 128 мм. Диаметр рабочего отверстия (по металлу) концентратора 2 равен 7 мм, ширина его рабочей зоны – 10 мм. Щелевая и главная изоляция разъемного концентратора выполнена из полиимидной пленки с силиконовым липким слоем (ПМЛ1).

Диаметр рабочей зоны (по металлу) одновиткового индуктора 1 (рис. 4,а) равен 7 мм, ширина его рабочей зоны – 10 мм. Щелевая и главная изоляция индуктора выполнена из полиимидной пленки (ПМ-А) толщиной 0,05 мм.

При обжиге трубчатой оболочки амплитудное значение напряженности магнитного поля на ее внутренней поверхности H_1 , обусловленное диффузией импульсного магнитного поля в материал, связано с напряженностью поля на ее внешней поверхности H_0 (без учета фазового сдвига) соотношением

$$H_1 = H_0 \cdot e^{-(h/\Delta)}, \quad (4)$$

При пережати трубчатых образцов из сплава АД31Т с применением многovitкового индуктора с концентратом магнитного поля (рис. 1) частота разрядного тока составляла $f=6,76$ кГц, а соответствующая ей глубина скин-слоя – $D=1,14$ мм при толщине стенки $h=1,35$ мм. В этом случае в соответствии с формулой (4) $H_1=0,31H_0$. Относительная величина противодействия со стороны просочившегося магнитного поля (без учета эффекта магнитной кумуляции) в это случае менее 10 %:

$$\Delta P = \frac{H_1^2}{H_0^2} = 0,096.$$

Но, как показали эксперименты, уже такая величина напряженности просочившегося магнитного поля принципиально изменяет характер деформационного процесса магнитно-импульсного обжатия тонкостенных труб малого диаметра.

Высокоскоростное обжатие трубчатой оболочки малого диаметра вызывало проявление рассматриваемого выше эффекта магнитной кумуляции просочившегося магнитного поля. Кумуляция магнитного поля создавала интенсивное внутреннее противодействие $P_{\text{МК}}$, препятствующее обжатию трубчатого образца. Значительная величина противодействия изнутри оболочки (обусловленная эффектом кумуляции просочившегося магнитного поля) и большая величина радиального давления ИМП со стороны индуктора (концентратора) вызывало интенсивное двухстороннее радиальное сжатие стенки трубчатой оболочки, превышающее предел текучести материала. Вместе с осевой составляющей давления импульсного магнитного поля со стороны индуктора, действующего на стенки кольцевого рифта, образующегося в процессе локального пережатия трубки, это приводило к интенсивной осевой деформации образцов в этой зоне. Ширина рифта порядка была порядка 18–20 мм, при ширине рабочей зоны индуктора 10 мм. Как следствие, магнитно-импульсное нагружение в условиях диффузии магнитного поля и его кумуляции приводило к значительному удлинению образца в зоне магнитно-импульсного нагружения (рис. 2,б), вплоть до образования шейки (рис. 2,в), и последующего продольного разрыва трубчатой оболочки с увеличением энергии разряда МИУ.



Рис. 3. Фото образцов длиной 40 мм:

а) исходный образец; б) обжатый образец ($W=28,4$ кДж); в) образование шейки ($W=32$ кДж)

При этом экспериментально установлено, что в этих условиях не происходило смыкания внутренней полости трубчатой оболочки во всем диапазоне энергии разряда МИУ, вплоть до осевого разрыва образцов (рис. 4)



Рис. 4. Не замыкание внутренней полости обжатых образцов после их осевого разрушения при магнитно-импульсном обжатии в условиях просачивания и кумуляции магнитного поля

При пережатии трубчатых образцов из сплава АД31Т с применением одновиткового индуктора (рис. 2) частота разрядного тока составляла $f = 28,6$ кГц, а соответствующая ей величина скин-слоя равнялась $\Delta = 0,55$ мм при толщине стенки $h = 1,35$ мм. Увеличение частоты разрядного тока в 4,23 раза уменьшило напряженность просочившегося поля в 3,6 раза до $H_1 = 0,086H_0$. В этом случае относительная величина противодействия со стороны просочившегося магнитного поля (без учета эффекта магнитной кумуляции) составляет

$$\Delta P = \frac{H_1^2}{H_0^2} = 0,007,$$

т.е. уменьшилась в 13,6 раза по сравнению с применением многовиткового индуктора с концентратором магнитного поля.

Принципиально важным являлось то, что практическое исключение просачивания магнитного поля и связанной с ним кумуляции магнитного поля в процессе высокоскоростного обжатия труб малого диаметра позволило получать образцы с полностью пережатым внутренним сечением при одновременной минимизации осевого растяжения образцов. Ширина полученного рифта была порядка 15 мм, при ширине рабочей зоны индуктора 10 мм (рис. 5).



Рис. 5. Фото образцов длиной 60 мм:
а) исходный образец; б) образец, обжатый до смыкания внутреннего канала ($W = 21,4$ кДж)

ВЫВОДЫ

Экспериментально показана необходимость учета влияния и минимизации эффекта кумуляции магнитного поля в процессах магнитно-импульсного обжатия труб малого диаметра. Кумуляция просочившегося внутрь оболочки импульсного магнитного поля не позволяет обеспечивать смыкание стенок оболочки в операциях магнитно-импульсного пережатия труб малого диаметра.

Для исключения возникновения эффекта кумуляции поля необходима минимизация просачивания магнитного поля во внутреннюю полость оболочек малого диаметра. Это достигается увеличением частоты разрядного тока при использовании одновитковых индукторов и/или использованием высокочастотных магнитно-импульсных установок. В качестве дополнительной меры для минимизации влияния магнитной кумуляции возможно применение технологических спутников при обжиме труб из материалов с высокой электропроводностью [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокофьев, А.Б. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ) / А.Б. Прокофьев, И.А. Беляева, В.А. Глушченков [и др.]. – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. – 140 с.
2. Черников, Д.Г. Исследование процесса магнитно-импульсной формовки с учетом эффекта просачивания магнитного поля сквозь заготовку / Д.Г. Черников, В.Ф. Карпухин, В.А. Глушченков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2020. – Т. 22. – № 2 (94). – С. 75-80.
3. Болтачев, Г.Ш. Динамика цилиндрических проводящих оболочек в продольном импульсном магнитном поле / Г.Ш. Болтачев, Н.Б. Волков, С.Н. Паранин, А.В. Спирин // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – № 6. – С. 1-9.
4. Самохвалов, В.Н. Исследование технологических возможностей управления процессами магнитно-импульсной штамповки тонкостенных деталей с использованием технологических спутников / В.Н. Самохвалов, В.П. Самохвалов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 1995. – № 3. – С. 107-111.
5. Шапиро, Д.Н. Электромагнитное экранирование / Д.Н. Шапиро. – Долгопрудный: ИД «Интеллект». 2010. – 120 с.
6. Батыгин, Ю.В. Особенности магнитно-импульсной «раздачи» тонкостенных трубчатых заготовок / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский // Электричество. – 2005. – № 11. – С. 62-67.
7. Мешков И.Н. Электромагнитное поле. Часть 1. Электричество и магнетизм. – Изд. 2-е, испр. и доп. / И.Н. Мешков, Б.В. Чириков. – М. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. – 544 с.
8. Биченков, Е.И. Две альтернативы магнитной кумуляции / Е.И. Биченков // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41. – № 5 (243). – С. 32-47.
9. Nakamura D., Ikeda A., Sawabe H., Matsuda Y.H., Takeyama S. Record indoor magnetic field of 1200 T generated by electromagnetic flux-compression. Review of Scientific Instruments, 2018; 89 (9): 095106. DOI: 10.1063/1.5044557.
10. В.Н. Самохвалов, В.Н. Кузнецов, Д.Г. Черников, Р.Ю. Юсупов. Способ пережатия металлических трубопроводов: Пат. 2830262 (РФ). 2024.

INFLUENCE OF THE EFFECT OF DIFFUSION AND CUMULATION OF THE FIELD ON MAGNETIC-PULSE CRIMPING OF SMALL DIAMETER PIPES

© 2025 V.N. Samokhvalov¹, D.G. Chernikov^{1,3}, Zh.V. Samokhvalova², N.V. Samokhvalov¹, R.Yu. Yusupov¹

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

² Volga State Transport University, Samara, Russia

³ Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

The features of compression of tubular blanks by the pressure of a pulsed magnetic field under conditions of a weak skin effect and manifestation of the magnetic cumulation effect are considered. An increase in the intensity on the inner wall of a small-diameter tubular blank relative to the case of a plane wave of a magnetic field and the occurrence of a significant cumulation of the leaked magnetic field during free compression of small-diameter pipes, preventing their deformation, are shown. The results of experimental studies of the process of magnetic-pulse compression of small-diameter tubular elements are presented. The need to take into account the influence and minimize the effect of cumulation of the magnetic field is shown. Cumulation of the pulsed magnetic field leaked inside the tubular shell does not allow for the closure of the pipe walls in operations of magnetic-pulse compression of small-diameter pipes.

Keywords: Pulsed magnetic field, tubular blank, compression, magnetic field diffusion, magnetic cumulation.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-116-123

EDN: HQKMUY

REFERENCES

1. Prokof'ev, A.B. Magnitno-impul'snaya obrabotka materialov (MIOM) / A.B. Prokof'ev, I.A. Belyaeva, V.A. Glushchenkov [i dr.]. – Samara: ANO «Izdatel'stvo SNC», 2019. – 140 s.
2. Chernikov, D.G. Issledovanie processa magnitno-impul'snoj formovki s uchetom effekta prosachivaniya magnitnogo polya skvoz' zagotovku / D.G. Chernikov, V.F. Karpuhin, V.A. Glushchenkov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2020. – Т. 22. – № 2 (94). – S. 75-80.

3. Boltachev, G.Sh. Dinamika cilindricheskikh provodyashchih obolochek v prodol'nom impul'snom magnitnom pole / G.Sh. Boltachev, N.B. Volkov, S.N. Paragin, A.V. Spirin // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2010. – T. 80. – № 6. – S. 1-9.
4. Samohvalov, V.N. Issledovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostey upravleniya processami magnitno-impul'snoj shtampovki tonkostennykh detalej s ispol'zovaniem tekhnologicheskikh sputnikov / V.N. Samohvalov, V.P. Samohvalov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Aviacionnaya tekhnika. – 1995. – № 3. – S. 107-111.
5. Shapiro, D.N. Elektromagnitnoe ekranirovanie / D.N. Shapiro. – Dolgoprudnyj: ID «Intelлект». 2010. – 120 s.
6. Batygin, Yu.V. Osobennosti magnitno-impul'snoj «razdachi» tonkostennykh trubchatyh zagotovok / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij // Elektrichestvo. – 2005. – № 11. – S. 62-67.
7. Meshkov I.N. Elektromagnitnoe pole. Chast' 1. Elektrichestvo i magnetizm. – Izd. 2-e, ispr. i dop. / I.N. Meshkov, B.V. Chirikov. – M. - Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2014. – 544 s.
8. Bichenkov, E.I. Dve al'ternativy magnitnoj kumulyacii / E.I. Bichenkov // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. – 2000. – T. 41. – № 5 (243). – S. 32-47.
9. Nakamura D., Ikeda A., Sawabe H., Matsuda Y.H., Takeyama S. Record indoor magnetic field of 1200 T generated by electromagnetic flux-compression. Review of Scientific Instruments, 2018; 89 (9): 095106. DOI: 10.1063/1.5044557.
10. V.N. Samohvalov, V.N. Kuznecov, D.G. Chernikov, R.Yu. Yusupov. Sposob perezhatiya metallicheskih truboprovodov: Pat. 2830262 (RF). 2024.

Vladimir Samokhvalov, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering. E-mail: samokhvalov.vn@ssau.ru

Dmitrii Chernikov, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor of Department of Metal Forming, Head of Laboratory of Advanced Technological Processes of Plastic Deformation (SRL-41) of Samara University, Senior Researcher, Department of Metal Physics and Aviation Materials, Samara Federal Research Center, Russian Academy of Sciences. E-mail: chernikov.dg@ssau.ru

Zhanna Samokhvalova, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor of Department of «Carriage facilities and ground transportation complexes». E-mail: j.samokhvalova@samgups.ru

Nikolay Samokhvalov, Research Assistant of Laboratory of Advanced Technological Processes of Plastic Deformation (SRL-41). E-mail: samokhvalov.nv@ssau.ru

Rinat Yusupov, Researcher of Laboratory of Advanced Technological Processes of Plastic Deformation (SRL-41). E-mail: wz@ssau.ru