

УДК 621.7; 629.7

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ

2009 Ю.Е. Паламарчук

Государственный научно-производственный ракетно-космический центр  
“ЦСКБ-Прогресс”, г. Самара

Поступила в редакцию 02.10.2009

В работе представлен анализ влияния технологических операций магнитно-импульсной штамповки на эксплуатационные характеристики индукторных систем.

Ключевые слова: магнитно-импульсная штамповка, индукторные системы.

Напряженно-деформированное состояние элементов индуктора зависит, в первую очередь, от характера силового воздействия магнитного поля. Динамические силы, действующие в системе индуктор-заготовка, зависят от вида и режима технологических операций, материала заготовки и параметров процесса деформирования.

Рассмотрены основные случаи нагружения индукторов на примере распространённых операций калибровки, формовки рифтов, раздачи и обжима элементов трубопроводов и отбортовки фланцев со степенями деформации заготовок соответственно 0÷5%, 10÷15%, 20÷30% и более 40%.

Для одинаковых параметров заготовки и индуктора время силового воздействия ИМП в системе индуктор-заготовка распределится следующим образом. В системе с постоянной индуктивностью (индуктор без заготовки), время процесса затухания давления магнитного поля будет составлять до 500 мксек. При калибровке, когда индуктивность меняется незначительно, весь процесс происходит в течение 350 мксек. Увеличение степени деформации заготовки до 15% сокращает время воздействия давления магнитного поля на индуктор до 200 мксек, т.е. в 2,5 раза, и при деформациях больше 40% процесс затухания идет в течение 150÷100 мксек. Результаты измерения времени воздействия давления ИМП на индуктор при различных технологических операциях приведены на рис. 1.

Данная зависимость наблюдается при различных габаритах обрабатываемых заготовок и характеризует влияние технологических операций на продолжительность нагружения индуктора давлением ИМП.

В общем случае нагружения индуктора давлением, можно выделить три основных варианта соотношений между механическими режимами процесса.

Паламарчук Юрий Ефимович, начальник отдела холодной штамповки. E-mail: d612@progress.samara.ru.

В первом случае, воздействие давления как, на индуктор, так и на заготовку, приближается к статическому, характерное время механических перемещений много меньше, чем период разряда. Параметры электрической цепи за время разряда меняются незначительно, мерилем перемещений “ $u$ ” является отношение  $u/\Delta_{э\text{кв}} < 1$ , что справедливо для операций сборки и калибровки толстостенных и “длинных” заготовок рис. 2.

Во втором варианте механические режимы нагружения индуктора остаются близкими к статическим, а на деформацию заготовки начинает оказывать существенное влияние инерционные аффекты: заготовка за время действия давления успевает разогнаться на малом пути, а потом уже движение продолжается по инерции.

Режим характерен для технологических операций формовки тонкостенных “длинных” заготовок. При операциях обжима давление магнитного поля будет действовать на витки индуктора в процессе всего тока разряда, но наиболее существенное влияние будут оказывать первые два пика давления.

Резкое затухание амплитуды тока разряда в системе заготовка-индуктор вызывает резкое уменьшение последующих импульсов давления магнитного поля.

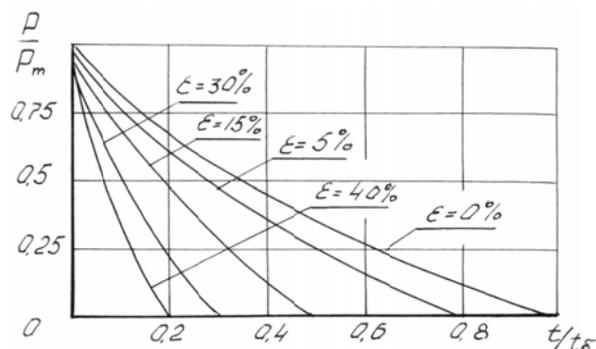
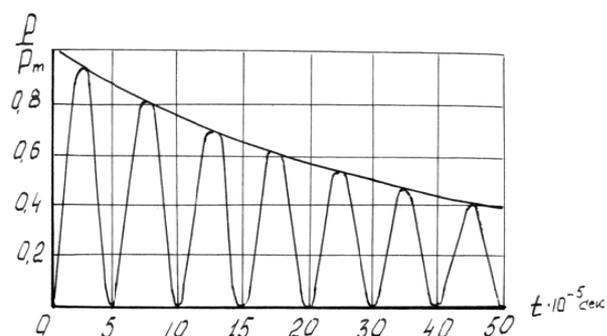


Рис. 1. Влияние степени деформации заготовки на продолжительность силового воздействия ИМП в системе “индуктор-заготовка”



**Рис. 2.** Характер действия нагрузки при технологических операциях калибровки

Для технологических операций обжима данный режим встречается крайне редко.

Наиболее часто встречается подобный режим при технологических операциях раздачи. Основное влияние давления магнитного поля оказывает на индуктор при движении заготовки на “активном” участке пути.

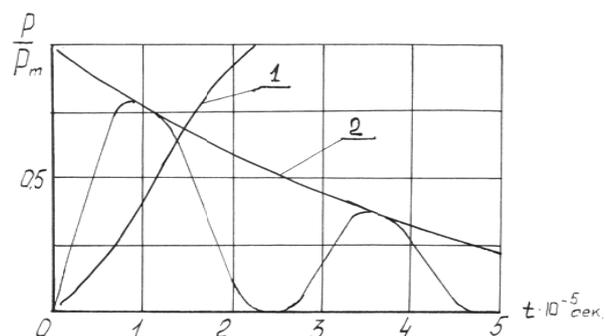
При движении заготовки по инерции давление на витки индуктора практически не действует.

Третий случай – перемещение заготовки – можно представить под действием импульса давления магнитного поля в течение времени разряда. Это наиболее сложный случай, так как за время перемещения происходит изменение параметров процесса.

Силы, действующие на индуктор со стороны заготовки, будут вызывать в конструкции “пульсирующие” напряжения. Чем медленнее будет изменяться индуктивность контура, тем продолжительней будет нагрузка на индуктор.

Характер нагружения будет приближаться к циклическому, что хорошо видно по изменению давления магнитного поля во времени для контура с медленно меняющейся индуктивностью. Режим “медленной” деформации характерен при достаточно малых значениях перемещения заготовки. При увеличении силы сопротивления наступает такой режим, когда заготовка ускоряется импульсами вблизи моментов максимума тока, успевая затормозиться за время между максимумами. В этом случае электромеханические силы будут преимущественно действовать в системе индуктор-заготовка отдельными толчками. При меньшей массе деформируемой заготовки, из-за быстрого её перемещения, импульс тока растянут по времени и весь процесс происходит в течение первой полуволны тока. Нагрузка, действующая на индуктор, кратковременна, при этом в большей степени проявляются инерционные свойства конструкции, что позволяет ей выдержать большие электромеханические силы (рис. 3).

Циклический характер нагружения индуктора существует при технологических операциях



**Рис. 3.** Характер действия нагрузки при технологических операциях формовки со степенью деформации заготовки:  
1 - характер перемещения заготовки;  
2 - характер изменения давления ИМП

калибровки тонкостенных заготовок из цветных металлов и сплавов и стальных заготовок на установках с высокой частотой тока разряда.

Нагружение индуктора наблюдается при операциях формовки тонкостенных оболочек на обжим и раздачу. Причём при технологических операциях обжима данный режим наблюдается несколько реже, чем при операциях раздачи.

Наиболее характерен режим нагружения индуктора “толчками” давления при формовке заготовок на раздачу, с деформациями до 10% на малых энергиях разряда установки МИУ.

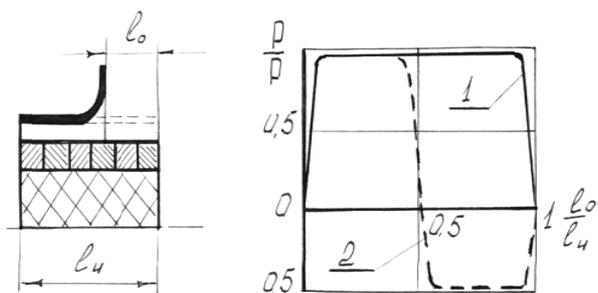
Динамический режим нагружения индуктора наблюдается при операциях сборки, сварки, резки и формовки коротких заготовок с величиной деформации более 15%.

Величина перемещения деформируемой заготовки, связанная со скоростью деформирования, оказывает влияние на характер перераспределения электромеханических сил в системе индуктор-заготовка, особенно для случая раздачи. В индукторах на раздачу режим деформирования заготовки, если скорость деформации превышает характерную скорость затухания тока в цепи, приводит к изменению знака радиального усилия, действующего на витки, которое происходит в результате перетекания тока с наружной на внутреннюю поверхность токопровода (рис. 4).

Влияние концов заготовки заключается в появлении дополнительных осевых сил сжимающих витки и изоляцию, что подтверждается экспериментальным определением распределения напряженности магнитного поля на краях индуктора.

Значения величины дополнительного осевого давления магнитного поля, действующего на торцы индуктора со стороны заготовки, приведены на рис. 5.

К следующей схеме нагружения относятся технологические операции, при которых длина заготовки меньше длины рабочей зоны индуктора:



**Рис. 4.** Характер изменения радиального давления ИМП, действующего на индуктор при отбортовке фланцев:  
 1 – начало деформации заготовки;  
 2 – конец деформации заготовки

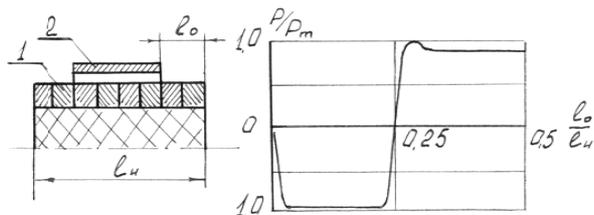
$$l_3 < l_u.$$

По данной схеме осуществляются технологические операции резки, отбортовки, некоторые виды сборки и характеризуются неравномерности распределения напряженности магнитного поля, в рабочем зазоре, по длине индуктора (рис. 6). Неравномерность обусловлена влиянием краевых эффектов магнитного поля в заготовке, что видно на рисунке, где скачок напряженности на концах заготовки достигает 20% от напряженности в рабочем зазоре.

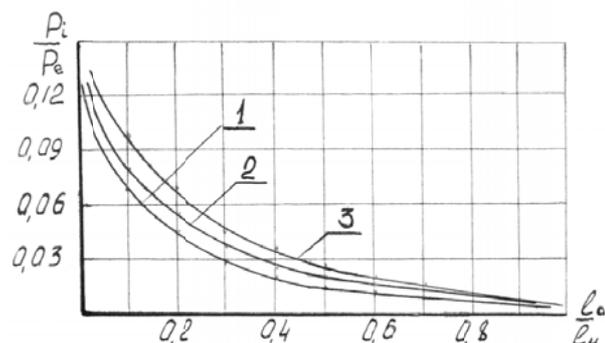
Кроме того, в индукторах для раздачи цилиндрических заготовок существует эффект перетекания тока на внутреннюю поверхность витков и соответственно перетекания магнитного поля во внутреннюю полость витков неприкрытых заготовкой.

В этом случае максимальное значение напряженности импульсного магнитного поля, существующего в данной системе индуктор-заготовка, малого диаметра, будет наблюдаться во внутренней полости неприкрытых витков. Давление магнитного поля в этом случае, сжимающее витки индуктора под заготовкой, стремится растянуть “свободные” витки. Между витками индуктора, под торцом заготовки, возникают максимальные осевые растягивающие силы, стремящиеся разломить индуктор.

Величина максимального значения межвитковой напряженности и, соответственно, давле-



**Рис. 6.** Характер распределения радиального давления магнитного поля в рабочем зазоре при  $l_u > l_3$ :  
 1 – индуктор, 2 – заготовка



**Рис. 5.** Характер изменения дополнительного давления ИМП, действующего на крайние витки индуктора при  $l_3 > l_u$ :  
 1 –  $d_u = 90 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $d_u = 75 \cdot 10^{-3}$  м; 3 –  $d_u = 50 \cdot 10^{-3}$  м

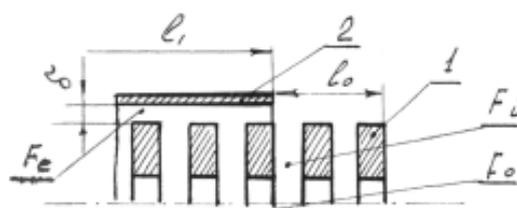
ния магнитного поля, действующего на соседние витки, наблюдается при схеме нагружения представленной на рис. 7.

Результаты экспериментального определения напряженности магнитного поля в зазоре между витками, находящиеся под торцом заготовки, приведены на рис. 8.

Самая сложная система максимальных нагрузок существует в начальный момент времени при минимальных перемещениях заготовки, когда торец её находится на середине рабочей зоны индуктора. В этот момент на витки индуктора действуют обжимающие усилия, раздающие и осевые силы, стремящиеся разломить конструкцию.

Для точного определения параметров нагружения необходима оценка уменьшения давления на индуктор из-за проникновения поля. Возможно для оценки этого фактора сравнение среднего за период давления, полученного с учетом проникновения поля со средним давлением, при отсутствии проникновения.

Влияние конструктивных особенностей индуктора на характер и распределение давления магнитного поля, действующего на токопровод, заключается в ослаблении давления магнитного поля в зависимости от виткового зазора, высоты и материала токопровода. Ослабление давления магнитного поля в индукторах происходит, в основном, за счёт просачивания поля в изоляци-



**Рис. 7.** К определению межвитковой напряженности магнитного поля под торцом заготовки при  $l_u > l_3$ :  
 1 – индуктор, 2 – заготовка

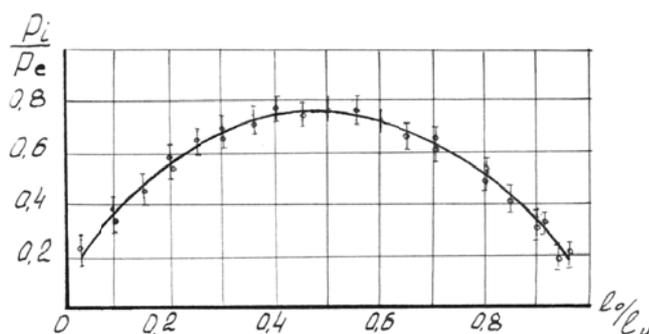


Рис. 8. Распределение давления ИМП в зазоре между витками, под торцом заготовки, при  $l_u > l_3$ .

онные промежутки между витками. Однако, при большом числе витков можно заменить эту картину другой и предположить, что утечка происходит по всей поверхности индуктора.

Таким образом, при проектировании и эксплуатации индукторов необходимо увязывать параметры технологических процессов, прочность индуктора и просачивания магнитного поля одновременно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилин А.Н., Родин Н.П., Паламарчук Ю.Е. и др. Повышение предельных возможностей технологических процессов магнитно-импульсной формовки калибровки тонкостенных деталей // Сборник трудов по ракетно-космической технике. Самара: ГНП РКЦ "ЦСКБ-Прогресс". 2003. С. 141-146.
2. Кирилин А.Н., Паламарчук Ю.Е., Казаков В.С., Самохвалов В.П. Высокоэффективные технологии изготовления трубчатых деталей пластическим деформированием // Сборник трудов по ракетно-космической технике. Самара: ГНП РКЦ "ЦСКБ-Прогресс". 2003. С. 133-137.
3. Барвинок В.А., Паламарчук Ю.Е., Кирилин А.Н., Самохвалов В.П., Вершигорев В.М. Экспериментальные исследования тепловых полей в индукторных системах при магнитно-импульсной штамповке // Вестник СГАУ. 2008. №1(14). С. 103-110.
4. Паламарчук Ю.Е., Кирилин А.Н., Вершигорев В.М. Выбор материалов для изготовления индукторных систем // Сб. научных трудов ГНП РКЦ "ЦСКБ-Прогресс". Самара: ГНП РКЦ "ЦСКБ-Прогресс". 2004.

#### INCREASE OF OPERATIONAL RELIABILITY OF INDUCTOR SYSTEMS DURING MAGNETIC AND PULSED PROCESSING WITH PRESS TOOL

© 2009 Y.E. Palamarchuk

State Research and Production Space-Rocket Center "TsSKB-Progress", Samara

Analysis of effect of processing operations of magnetic and pulsed processing with press tool on operating characteristics of inductor systems is represented in the given paper.

Key words: magnetic and pulsed processing with press tool, inductor systems.