

*Д. В. ЛАВИНСКИЙ*, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

## **ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ СИЛАМИ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

В статье рассмотрен возможный подход к оценке конструкционной прочности индукторов – основных элементов технологических систем при магнитно-импульсной обработке материалов. Предложенная методика базируется на совместном моделировании и анализе распределения электромагнитных и механических полей в системах «индуктор-заготовка». Численный анализ предполагает использование метода конечных элементов. Для одного класса индукторных систем проанализировано влияние технологического параметра (величины силы тока) на эффективность технологической операции и на конструкционную прочность индуктора.

**Ключевые слова:** конструкционная прочность, импульсные электромагнитные поля, индукторная система, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

**Введение.** Высокоинтенсивные электромагнитные поля (ЭМП) являются неотъемлемым атрибутом работы множества технических и технологических систем. Сюда можно отнести и системы для магнитно-импульсной обработки материалов (МИОМ). Основой работоспособности подобных систем является выполнение условий конструкционной прочности основного элемента – индуктора (соленоида).

**Актуальность и состояние проблемы.** МИОМ основана на явлениях пластического деформирования ряда материалов и на явлении возникновения пондеромоторных сил (ПС) в проводящих телах, помещенных в ЭМП. Целью МИОМ (как и большинства технологических операций, базирующихся на пластическом формоизменении заготовок) является создание силового воздействия как можно большей интенсивности. В МИОМ данная цель достигается путем повышения уровней интенсивности магнитного поля. При этом, ЭМП оказывает силовое воздействие также и на индуктор, который является основным конструктивным элементом, создающим силовое воздействие. То есть, повышение уровней ПС в материале заготовки также приводит к повышению ПС, действующих на индуктор.

Работоспособность систем МИОМ в значительной степени определяется выполнением условий конструкционной прочности индуктора. Таким образом создание методик для оценки конструкционной прочности индуктора при МИОМ является актуальной научно-практической проблемой.

**Методика оценки конструкционной прочности индукторов.** Экспериментальные и теоретические исследования [1-4] показывают, что потеря

работоспособности систем МИОМ происходит вследствие: пластического деформирования индуктора со значительными степенями остаточных деформаций, мгновенного разрушения индуктора (при первом же импульсе поля), разрушения после  $\sim 10^2$  повторяющихся импульсов поля, разрушение после  $\sim 10^6$  повторяющихся импульсов поля. Последний тип разрушения для исследований большого интереса не представляет, так как в этом случае технологическая система, чаще всего, выполняет свое предназначение в полном объеме. В указанных первых трех случаях, очевидно при первом же нагружении индуктора (при первом импульсе поля) в его материале возникают зоны пластических деформаций.

Поэтому критерий, обеспечивающий работоспособность индуктора, в первом приближении может быть сформулирован:

$$\sigma_{i \max}^{\text{инд}} \leq \sigma_T, \quad (1)$$

где  $\sigma_{i \max}^{\text{инд}}$  – максимальная интенсивность напряжений в материале индуктора,

$\sigma_T$  – предел текучести материала индуктора.

С другой стороны, эффективность технологической операции при МИОМ в первую очередь определяется достижением определенного уровня пластических деформаций заготовки. Чаще всего это достигается в процессе повторяющегося воздействия на заготовку, но также ясно, при первом импульсе поля в материале заготовки должны появиться зоны пластических деформаций, что может быть определено условием:

$$\sigma_{i \max}^{\text{заг}} > \sigma_T, \quad (2)$$

где  $\sigma_{i \max}^{\text{заг}}$  – максимальная интенсивность напряжений в материале заготовки,

$\sigma_T$  – предел текучести материала заготовки. Одновременное выполнение условий (1) и (2) при первом импульсе нагружения может свидетельствовать о работоспособности технологической системы для МИОМ и о достижении цели технологической операции.

Для того, чтобы производить оценку согласно условиям (1) и (2), необходимо предварительно производить анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) систем «индуктор-заготовка».

Анализ НДС при наличии ЭМП не будет исчерпывающим без предварительного анализа распределения компонент ЭМП в индукторе и заготовке. Причем расчетная схема должна быть общей, то есть, учитывающая взаимное влияние индуктора и заготовки. Также отметим, что традиционные способы оценки НДС при МИОМ оперируют с понятием «магнитного давления» [1,5], которое прикладывается к границе обрабатываемого объекта. В то же время известно, что ПС являются объемными, таким образом, традиционные методы не могут считаться точными. Достаточно легко учесть реальную картину распределения ПС можно при использовании метода конечных элементов (МКЭ).

В работах [6,7,8,9,10] представлена математическая постановка задачи упруго-пластического деформирования системы тел при наличии магнитного поля, а также проведено моделирование и анализ распределения ЭМП для одного класса индукторных систем. В работе [10] показаны возможности использования МКЭ для анализа НДС индукторной системы и заготовки. Предложенные в этих работах методы анализа ЭМП и НДС систем «индуктор-заготовка» используются для оценок конструкционной прочности индукторов и для анализа пластического формоизменения заготовок.

**Пример оценки конструкционной прочности одного класса индукторных систем.** Рассмотрим применение описанной выше методики для одного класса индукторных систем.

На рис. 1, *а* представлен индуктор с рабочей зоной в форме усеченного конуса, а на рис. 1, *б* – кольцевой индуктор. Это одновитковые индукторы, которые предназначены для притяжения тонкостенных заготовок «магнитными» силами. Данный эффект проверен экспериментально [1,3] и не противоречит теоретическим положениям электромеханики [5]. Отметим, что результаты численного моделирования ЭМП при помощи МКЭ для индуктора (см. рис. 1, *а*) показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными [8].

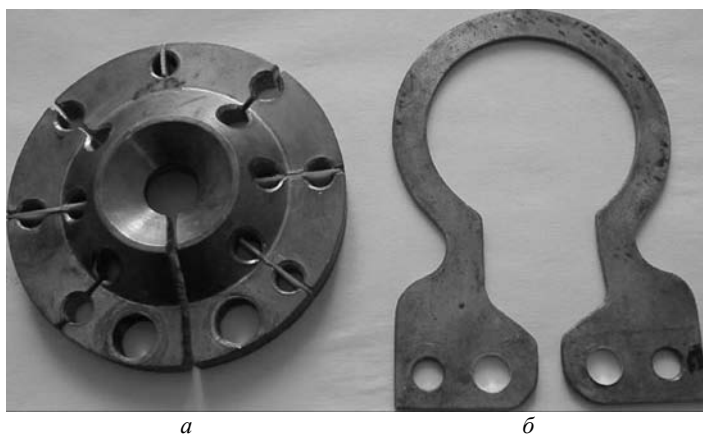
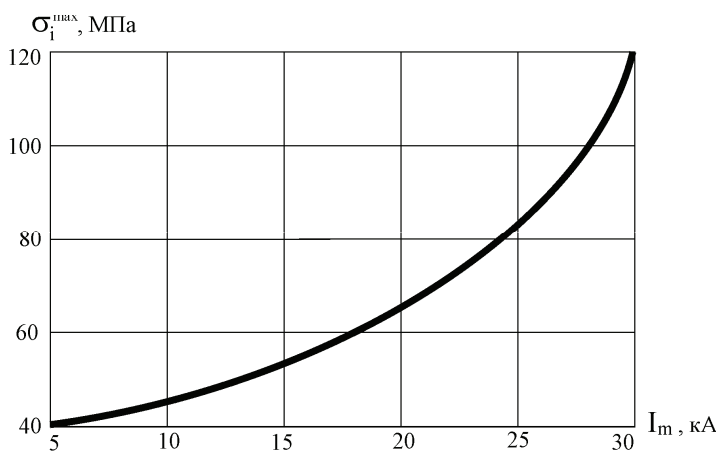
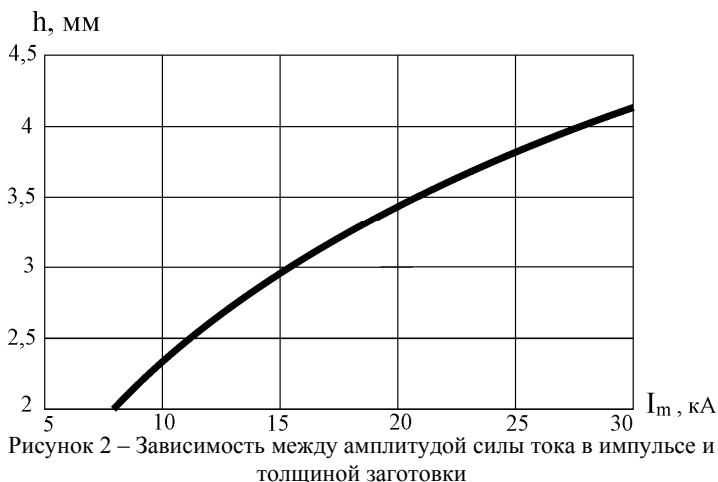


Рисунок 1 – Индуктор: *а* – с рабочей зоной в форме усеченного конуса; *б* – кольцевой индуктор

Оценка конструкционной прочности индуктора (см. рис. 1, *а*) проводилась на основании анализа НДС системы «индуктор-заготовка» [10]. Предварительно рассматривалась эффективность технологической операции для заготовок различной толщины. На рис. 2 приведена зависимость между амплитудой силы тока в импульсе, при которой в материале заготовки возникают пластические деформации, и толщиной заготовки. Как видно из графика

ка рабочие значения величины амплитуды лежат в диапазоне 5-20 кА, так как, заготовки большей толщины (для пластического деформирования которых нужны большие величины силы тока) не являются объектами обработки для подобного класса индукторных систем [1-3]. Результаты, полученные из анализа упруго-пластического деформирования заготовки, являются необходимой информацией для дальнейшей оценки конструкционной прочности индуктора.

На рис. 3 приведена зависимость между максимальной интенсивностью напряжений, возникающей в материале индуктора, и амплитудой силы тока в импульсе.



Из графика (см. рис. 3) видно, что уже при значениях силы тока порядка 10 – 15 кА в материале индуктора возникают значительные уровни напряжений, при которых интенсивность напряжений сопоставима с пределами текучести меди, бронзы, алюминия (материалов, из которых традиционно изготавливаются индукторы). Очевидно, что при больших величинах силы тока прочность индуктора будет нарушена (дальнейшее разрушение произойдет в результате малоциклового усталости).

**Выводы.** В статье рассмотрена методика оценки конструкционной прочности индукторов в технологических системах для МИОМ. Методика базируется на конечно-элементном моделировании ЭМП и анализе НДС систем «индуктор-заготовка». Для одного класса индукторов приведены рекомендации по применению в определенных технологических условиях.

**Список литературы:** 1. *Туренко А.Н.* Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Т. 3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография / *Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В.* – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с. 2. *Батыгин Ю.В.* Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах / *Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Чаплыгин Е.А.* // *Электротехника і електромеханіка.* – Х.: 2005. – № 3. – С. 69-73. 3. *Батыгин Ю.В.* Вихревые токи в плоских листовых металлических заготовках / *Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А.* // *Электротехника і електромеханіка.* – Х.: 2006. – № 5. – С. 54-59. 4. *Гачкевич О.Р.* Несуча здатність електропровідних елементів канонічної форми за дії електромагнетних імпульсів / *Гачкевич О.Р., Мусій Р.С.* // *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* – Львів: 2010. – Т. 46, № 4. – С. 92-97. 5. *Круг К.А.* Основы электротехники. / *Круг К.А.* – М.-Л.: Главная ред. энергетической литературы, 1936. – 887 с. 6. *Лавинский Д.В.* Колебания круглой пластины в переменном магнитном поле / *Лавинский Д.В.* // *Матем. мет. в техн. и технологиях – ММТТ-25:* сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 3. Секции 5 / под общ. ред. *А.А.Большакова.* – Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012; Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – 184 с. – С. 58-59. 7. *Oleg K. Morachkovsky* Nonlinear dynamics of a thin plate in a nonstationary electromagnetic field of the inductor / *Oleg K. Morachkovsky, Denis V. Lavinsky* // *Нелінійна динаміка / Тези доповідей 4-ої міжнародної конференції (19-22 червня, 2013р, Севастополь).* – Х.: Вид-во «Точка», 2013. – С. 299-304. 8. *Лавинский Д.В.* Моделирование та анализ импульсных электромагнитных полей у системах для обработки материалов / *Лавинский Д.В.* // *Вісник НТУ «ХПІ».* – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 67(973) . – С. 61-67. 9. *Лавинский Д.В.* Задачі пружно-пластичного деформування тіл при магнітно-імпульсному навантаженні / *Лавинский Д.В.* // *Машинознавство.* – Львів: «КІНПАТРИ ЛТД», 2011. – № 7-8 (169-170). – С. 48-51. 10. *Лавинский Д.В.* Анализ напряженно-деформированного состояния систем для обработки материалов силами импульсных электромагнитных полей / *Д.В. Лавинский* // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Динаміка і міцність машин.* – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 58 (1031). – С. 92-98.

*Поступила в редколлегию 22.10.2013*

УДК 539.3

**Один из подходов к оценке конструкционной прочности устройств для обработки материалов силами импульсных электромагнитных полей / Д. В. Лавинский** // *Вісник НТУ «ХПІ».* Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 63 (1036). – С. 64-69. – Бібліогр.: 10 назв.

У статті розглянуто можливий підхід до оцінювання конструкційної міцності індукторів – основних елементів технологічних систем при магнітно-імпульсній обробці матеріалів. Запропонована методика базується на сумісному моделюванні та аналізі розподілу електромагнітних та механічних полів у системах «індуктор-заготовка». Чисельний аналіз передбачає використання

методу скінчених елементів. Для одного класу індукторних систем проаналізовано вплив технологічного параметру (величини сили струму) на ефективність технологічної операції та на конструкційну міцність індуктору.

**Ключові слова:** конструкційна міцність, імпульсні електромагнітні поля, індукторна система, метод скінчених елементів, напружено-деформований стан.

The possible approach to the assessment of structural strength of inductors – the main elements of the technological systems with magnetic-pulse processing of materials is described in the article. The proposed method is based on the joint modelling and analysis of distribution of electromagnetic and mechanical fields in systems «inductor-billet». Numerical analysis involves the use of the finite element method. For one class of inductor systems of the influence of technological parameter (the value of the force of a current) on the efficiency of the technological cleaning operations and the structural strength of the inductor.

**Keywords:** structural strength, pulse electromagnetic fields, inductor system, finite element method, stress-strain state.

УДК 539.3

**А. А. ЛАРИН**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»;

**А. С. СТЕПЧЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

## **ВЫНУЖДЕННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК С ДИНАМИЧЕСКИМ КОНТАКТОМ В РАЗЪЕМНОМ БАНДАЖЕ ПРИ СИНФАЗНОМ НАГРУЖЕНИИ**

В роботі досліджуються коливання лопаток парової турбіни з роз'ємним поличним бандажем. Для розроблених лінеаризованої та нелінійної скінчено-елементної моделей пакету з двох лопаток проведені розрахунки динамічних характеристик й їх порівняльний аналіз. Отримані результати показали можливість зриву контакту в роз'ємному бандажі в процесі коливаний та їх нелінійний характер.

**Ключові слова:** коливання, роз'ємний поличний бандаж, зрив контакту.

**Введение.** Среди всевозможных отказов, происходящих в паровых турбинах, большое распространение имеют поломки, вызванные повышенными уровнями вибраций. При этом наиболее динамически нагруженным элементом являются лопаточные аппараты цилиндра низкого давления паровой турбины. В современном турбиностроении для повышения жесткости данных лопаток используется межлопаточные связи [1-3], которые представляют собой разъемные соединения.

Характеристики динамики и прочности этих конструкций существенно зависят от особенностей контактного взаимодействия в таком бандаже [1, 2]. В современной инженерной практике для исследования вибрационных ха-

© А. А. Ларин, А. С. Степченко, 2013