

Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин, С.А. Шиндерук, В.А. Стрельникова

## ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ТОКОВ И СИЛ В ЛИНЕЙНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ. ЧАСТЬ 2: МЕТАЛЛЫ С ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ

*Мета.* Метою роботи є обґрунтування дієздатності лінійних інструментів магнітно-імпульсного притягання тонкостінних листових металів з високою питомою електропровідністю, принцип дії яких заснований на силовій взаємодії провідників з односпрямованими струмами при інтенсивному проникненні збуджених полів. *Методика.* Для чисельних оцінок використовувалися аналітичні залежності, отримані за допомогою методів теорії електромагнітного поля, і стандартні програми з пакету «Wolfram Mathematica». *Результати.* Проведені обчислення ілюструють амплітудно-часові залежності для збуджених струмів і сил при необхідному зниженні робочих частот діючих електромагнітних полів. Обґрунтовано дієвість лінійних магнітно-імпульсних інструментів, заснованих на збудженні сил взаємного притягання провідників з низькочастотними односпрямованими струмами. *Наукова новизна.* На прикладі з алюмінієм, який є основним сировинним матеріалом у сучасному авіа- та автомобілебудуванні, встановлено, що для металів з високою питомою електропровідністю потрібно значне зниження робочих частот, що необхідно для інтенсифікації процесів проникнення діючих полів і, відповідно, для збудження реальних сил притягання. *Практичне значення.* Результати роботи дозволяють сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо створення та практичного застосування лінійних інструментів магнітно-імпульсного притягання в прогресивних технологіях відновлення пошкоджених ділянок корпусних покриттів з тонкостінних листових металів з високою питомою електропровідністю. Бібл. 10, рис. 4.

*Ключові слова:* метали з високою питомою електропровідністю, інтенсивне проникнення поля, магнітно-імпульсне притягання провідників з односпрямованими струмами, лінійний інструмент усунення вм'ятин в корпусних покриттях.

*Цель.* Целью работы является обоснование дееспособности линейных инструментов магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов с высокой удельной электропроводностью, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии проводников с однонаправленными токами при интенсивном проникновении возбуждаемых полей. *Методика.* Для численных оценок использовались аналитические зависимости, полученные с помощью методов теории электромагнитного поля, и стандартные программы из пакета «Wolfram Mathematica». *Результаты.* Проведенные вычисления иллюстрируют амплитудно-временные зависимости для возбуждаемых токов и сил при требуемом понижении рабочих частот действующих электромагнитных полей. Обоснована действенность линейных магнитно-импульсных инструментов, основанных на возбуждении сил взаимного притяжения проводников с низкочастотными однонаправленными токами. *Научная новизна.* На примере с алюминием, который является основным сырьевым материалом в современном авиа- и автомобилестроении, установлено, что для металлов с высокой удельной электропроводностью требуется значительное понижение рабочих частот, что необходимо для интенсификации процессов проникновения действующих полей и, соответственно, для возбуждения реальных сил притяжения. *Практическое значение.* Результаты работы позволяют сформулировать обоснованные рекомендации по созданию и практическому применению линейных инструментов магнитно-импульсного притяжения в прогрессивных технологиях восстановления повреждённых участков корпусных покрытий из тонкостенных листовых металлов с высокой удельной электропроводностью. Библ. 10, рис. 4.

*Ключевые слова:* металлы с высокой удельной электропроводностью, интенсивное проникновение поля, магнитно-импульсное притяжение проводников с однонаправленными токами, линейный инструмент устранения вмятин в корпусных покрытиях.

**Введение.** Всё возрастающий интерес к прогрессивным экологически чистым высокопроизводительным технологиям, основанным на использовании энергии импульсных магнитных полей, обусловлен практическими потребностями различных отраслей современной промышленности, включающих не только производство номенклатурных продуктов, но и их восстановление при повреждениях в процессе эксплуатации [1-3].

Обширный сектор обрабатывающих технологий, развитие которых обусловлено требованиями, например, производителей транспортных средств, объединяет совокупность методов реставрации металлических покрытий элементной базы их корпусных составляющих. Востребованность таких технологий следует из негативов эксплуатационной практики. Так, вмятин на поверхности летательного аппарата приводят к изменению его аэродинамических характеристик и целому ряду возможных аварийных ситуаций. Повреждения корпусов водных и наземных ви-

дов транспорта – это не только нарушения эстетики. В известных форс-мажорных обстоятельствах они могут стать причиной крушений на воде и смертельных происшествий на дорогах [4].

**Обзор литературы.** Известные и широко распространённые механические технологии устранения вмятин просты и относительно дешёвы в реализации. Но их производительность, надёжность, качество и показатели экологической чистоты остаются весьма низкими. Так, довольно часто механическое вытягивание металла вмятин приводит к нарушению его целостности. Возникшая проблема требует уже своего отдельного подхода к её решению.

Использование энергии импульсных магнитных полей открывает новые возможности для создания прогрессивных реставрационных технологий, свободных от вышеперечисленных недостатков. Среди них устранение вмятин с помощью линейных инструмен-

тов магнитно-импульсного притяжения повреждённых участков тонкостенных листовых металлических покрытий автомобильных кузовов, корпусов летательных аппаратов и водных видов транспорта. В основу действенности таких инструментов положен закон Ампера, согласно которому проводники с однонаправленными токами испытывают взаимное притяжение [5, 6]. Конструктивно такими проводниками в линейном инструменте являются основной токопровод (аналог индуктора в традиционной магнитно-импульсной обработке металлов [1, 3]) и реставрируемый участок повреждённого металла. Геометрически они (токопровод и обрабатываемый металл) параллельны. Электрически их соединение относительно общих точечных контактов с высоковольтным источником мощности может быть параллельным или последовательным [1, 7, 8]. Как следует из физических соображений, основным препятствием к эффективному возбуждению электродинамических сил взаимодействия между проводниками в такой системе становятся индукционные эффекты, соответственно которым ток в основном токопроводе индуцирует протиток в листовой заготовке, а ток в её металле индуцирует протиток в основном токопроводе.

В целом, главные достоинства линейного инструмента магнитно-импульсного притяжения листовых металлов – это, в первую очередь, простота технической реализации, высокие производственные показатели и надёжность выполняемой производственной операции (в смысле сохранности реставрируемого объекта) [8]. Среди перспективных технологий магнитно-импульсного притяжения листовых металлов, позволяющих восстановление повреждённых участков с внешней стороны корпусов транспортных средств, следует отметить теоретически и экспериментально обоснованные предложения, сформулированные авторами работ [9, 10].

Заканчивая обзор публикаций по рассматриваемой теме, подчеркнём универсальность инструментов магнитно-импульсного силового воздействия на листовые металлы с различными электрофизическими характеристиками. Объекты обработки могут быть не только из стали, но и из алюминиевых сплавов. Причём последние находят всё более широкое применение для изготовления лёгких и прочных технических конструкций разного назначения. С физической точки зрения отмеченная универсальность обеспечивается возможностями регулировки рабочих частот от источника действующих электромагнитных полей, что позволяет осуществить притяжение или отталкивание заданных участков листовых металлов в любых штамповочных и реставрационных производственных операциях [1, 3, 7].

**Целью** статьи является определение условий и оценка работоспособности линейных инструментов магнитно-импульсного притяжения заданных участков листовых металлов с высоким значением удельной электропроводности.

Для достижения поставленной цели необходимо рассчитать характеристики электродинамических процессов при понижении рабочих частот токовых им-

пульсов, что, физически, позволяет варьировать интенсивность проникновения возбуждаемых полей в металлические элементы объекта исследования. Результатом вычислений должны стать численные оценки и физико-математические иллюстрации, необходимые для определения условий эффективного возбуждения электродинамических усилий в рабочих зонах линейных инструментов магнитно-импульсного притяжения. Справедливости ради следует отметить, что подобная задача уже рассматривалась авторами публикаций [7, 8]. Однако, непосредственное использование полученных ими формул для проведения расчётов и анализа протекающих процессов не представляется возможным из-за ограниченности найденных в [7, 8] результатов условиями постановки и решения рассматриваемых задач.

При решении поставленной задачи воспользуемся физико-математической моделью исследуемого инструмента магнитно-импульсного притяжения и функциональными зависимостями для характеристик протекающих электродинамических процессов, описанными в работе [6]. Для ясности дальнейшего изложения укажем основные положения, частично повторяющие материал публикации [6].

#### **Принятые допущения и постановка задачи:**

- принципиальные схемы реализации магнитно-импульсного притяжения тонкостенных металлов в линейных инструментах, а также расчётная модель (поперечный разрез исследуемой системы) представлены на рис. 1;

- притяжению подлежит листовой немагнитный металл (например, алюминий или его сплавы) с достаточно большими поперечными размерами, толщиной –  $d$  и удельной электропроводностью –  $\gamma$ ;

- имеет место геометрическая симметрия относительно координатной плоскости  $ZOX$ . Вдоль оси абсцисс  $OX$  исследуемая система обладает достаточно большой протяжённостью, так что соответствующий оператор дифференцирования –  $\partial/\partial x = 0$ ;

- в подключённых к высоковольтному источнику мощности основном токопроводе и параллельном участке листового металла возбуждающие токи с заданными амплитудно-временными характеристиками протекают только в продольном направлении (рис. 1, б).

**Алгоритм решения.** Как следует из принятых допущений, в исследуемой системе возбуждаются нетривиальные компоненты вектора электромагнитного поля:  $E_x \neq 0$ ,  $H_{y,z} \neq 0$ , которые находятся интегрированием уравнений Максвелла.

Из закона Ома в дифференциальной форме по известной напряжённости электрического поля определяются токи, индуцированные в основном токопроводе и соответствующем участке листового металла. Суперпозиция тока от высоковольтного источника мощности и индуцированного тока позволяет найти амплитудно-временные характеристики суммарных токов в каждом из проводящих элементов линейного инструмента магнитно-импульсного притяжения.

Для максимума силового взаимодействия проводников протекающие в них токи должны быть одинаковыми (это условие практически обеспечивается соответствующим выбором параметров линейного

инструмента). В этом случае, согласно закону Ампера, сила притяжения, возбуждаемая в рабочей зоне между основным токопроводом и листовым металлом, находится как величина, пропорциональная квадрату протекающих в них токов.

Опуская громоздкие расчётные аналитические зависимости достаточно строго обоснованные и приведенные в [6], перейдём к численным оценкам характеристик и анализу процессов в линейном инструменте магнитно-импульсного притяжения.

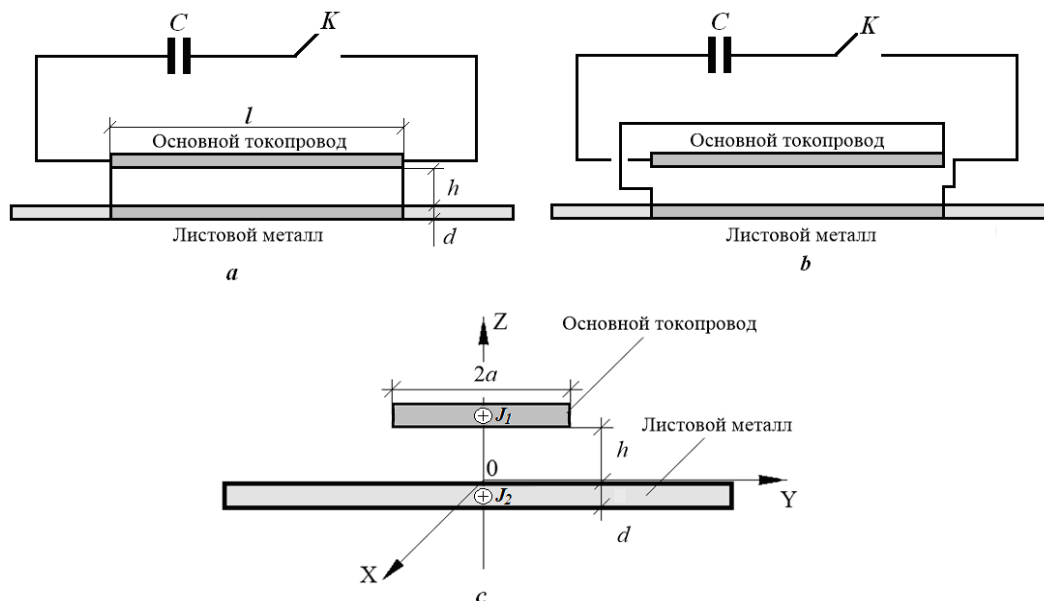


Рис. 1. Линейные инструменты магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов: *a* – принципиальная схема параллельного подключения, *b* – принципиальная схема последовательного подключения; *c* – расчётная модель; *C* – ёмкостной накопитель энергии, *K* – коммутатор;  $J_{1,2}$  – протекающие токи в токопроводе и обрабатываемом металле

**Численные оценки** проведём для следующих исходных данных:

1. Деформированию подлежат алюминиевые листовые образцы толщиной –  $d = 0,0008$  м и удельной электропроводностью –  $\gamma = 3,75 \cdot 10^7$  1/Ом·м.

2. Основной токопровод инструмента также выполнен из алюминия той же толщины, что и обрабатываемый объект (рассматривается электродинамическая система – «алюминий-алюминий»).

3. Длина и ширина рабочей зоны –  $l = 0,06 \dots 0,1$  м и  $2a = 0,01$  м, соответственно, расстояние между проводниками линейного инструмента –  $h = 0,002$  м.

4. Основной токопровод и заданный участок обрабатываемого металла идентичны, геометрически и электрически параллельны, так что возбуждающие токи, протекающие в цепи каждого из них, одинаковы.

**Примечание.** Согласно закону Ампера последняя исходная предпосылка позволяет достичь максимума сил взаимодействия проводников с однонаправленными токами [5, 6].

Параметры токовых импульсов определяются характеристиками источника мощности – магнитно-импульсной установки МИУС-2, разработанной и созданной в Лаборатории электромагнитных технологий кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета [1]. Примем, что для указанной электроустановки:

1. Максимальное напряжение на ёмкостном накопителе –  $U = 2000$  В.

2. Собственная рабочая частота (в короткозамкнутом разрядном контуре) –  $f_{\max} = 7000$  Гц и относительный коэффициент затухания –  $\delta/\omega = 0,3$ .

3. Временная форма возбуждающего тока в операции притяжения – аperiodический униполярный сигнал с рабочей частотой –  $f_p = 1000 \dots 1500$  Гц и относительным коэффициентом затухания –  $\delta/\omega \approx 0,3$ .

4. Инструмент подключается к источнику мощности через согласующее устройство, обеспечивающее понижение рабочей частоты до требуемого значения, с коэффициентом передачи энергии в рабочую зону –  $K \approx 4$ .

Расчёты проводились аналогично тому, как это было сделано в [6] с использованием стандартных программ из пакета «Wolfram Mathematica». Отдельно следует указать, что математическая строгость выполненных расчётов (с погрешностью в среднем до  $\sim 7,5$  %) устанавливалась соответствующим выбором интервалов численного интегрирования и количеством слагаемых в суммах дискретных разложений в выражениях для характеристик исследуемых электромагнитных процессов.

Графики возбуждаемых токов и электродинамических сил притяжения в зависимости от их фазы ( $\varphi = \omega \cdot t$ ,  $\omega$  – круговая частота,  $t$  – время) представлены на рис. 2-4.

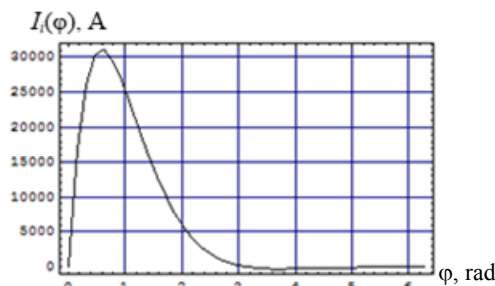


Рис. 2. Возбуждающий ток от высоковольтного источника мощности

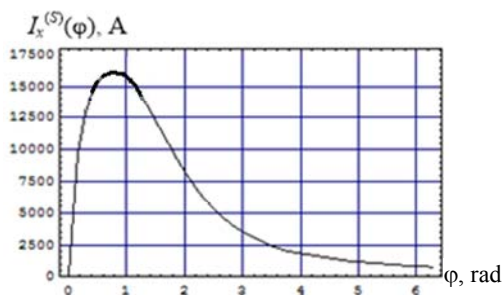


Рис. 3. Суммарный ток в каждом из проводников линейного инструмента

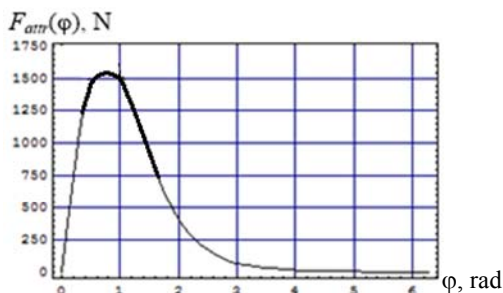


Рис. 4. Возбуждаемая сила магнитно-импульсного притяжения

Анализ результатов проведенных вычислений показывает, что:

- в принятых условиях работы линейного инструмента индукционные эффекты оказывают существенное влияние на электромагнитные процессы в проводниках исследуемой системы;
- амплитуда суммарного тока в основном токопроводе и листовом металле падает и составляет до ~ 49 % амплитуды тока от высоковольтного источника мощности (~ 32 кА – источник, ~ 15,7 кА – индуцированный ток, ~ 16,3 кА – суммарный ток);
- амплитуда возбуждаемой силы притяжения близка к ~ 1520 Н;
- в принятых условиях данный силовой показатель должен обеспечить магнитно-импульсное притяжение листового алюминия (металла с высокой удельной электропроводностью) с помощью рассматриваемого линейного инструмента [3];
- соответствующий выбор геометрии рабочей зоны и временных характеристик возбуждающего тока позволяет получить достаточно близкие численные показатели электродинамических процессов в исследуемой системе при работе, как с алюминием, так и со сталью [6].

#### Выводы.

1. На примере обработки алюминия определены условия работоспособности линейных инструментов магнитно-импульсного притяжения заданных участков листовых металлов с высоким значением удельной электропроводности.

2. Установлено, что, успешное магнитно-импульсное притяжение возможно при достаточно низких рабочих частотах возбуждающих токов (~ 1500 Гц), что обеспечивает интенсивное проникновение электромагнитных полей в проводники инструмента производственной операции и возбуждение мощных сил магнитного давления извне.

3. Показано, что в принятых условиях индукционные эффекты оказывают существенное влияние на электромагнитные процессы в проводниках линейного инструмента и снижают возбуждаемые токи на ~ 45 % относительно тока от высоковольтного источника мощности.

Работа проводилась кафедрой физики ХНАДУ в рамках Научного исследования: «Энергосберегающие малозатратные технологии питания и ремонта транспортных средств» 08-53-19, финансируемого Министерством образования и науки Украины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2018. – no.3. – pp. 43-52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.06.
2. Eguia I., Mangas A., Iturbe R., Gutierrez Ma.A. Electromagnetic forming of longitudinal strengthening ribs in roll formed automotive profiles // *Proceedings of 4th International Conference on High Speed Forming. ICHSF 2010*. Columbus. – 2010. – pp. 198-207. doi: 10.17877/DE290R-12593.
3. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – vol.211. – no.5. – pp.787-829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
4. Welcome to BETAG Innovation [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.betaginnovation.com>.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Т.8, Изд. 4-е. – М.: Физматлит, 2005. – 656 с.
6. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: Low electrical conductance metals // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2019. – no.5. – pp. 40-44. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07.
7. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Расчёт полей и токов в индукторной системе с притягивающим экраном и дополнительным витком как инструмента рихтовки // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №1. – С. 57-62. doi: 10.20998/2074-272X.2015.1.11.
8. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2016. – no.5. – pp. 35-39. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.05.
9. Gnatov A., Argun S. New method of car body panel external straightening: tools of method // *International Journal of Vehicular Technology*. – 2015. – vol.2015. – pp. 1-7. doi: 10.1155/2015/192958.
10. Hnatov A., Arhun S., Dziubenko O., Ponikarovska S. Choice of electric engines connection circuits in electric machine unit of electric power generation device // *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. – 2018. – vol.12. – no.4. – pp. 85-93.

#### REFERENCES

1. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.3, pp. 43-52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.06.
2. Eguia I., Mangas A., Iturbe R., Gutierrez Ma.A. Electromagnetic forming of longitudinal strengthening ribs in roll formed automotive profiles. *Proceedings of 4th International Conference on High Speed Forming. ICHSF 2010, Columbus*, 2010, pp. 198-207. doi: 10.17877/DE290R-12593.

3. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol.211, no.5, pp.787-829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
4. *Welcome to BETAG Innovation*. Available at: <http://www.betaginnovation.com> (accessed 17 June 2018).
5. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnyh sred T. 8* [Continuum Electrodynamics. Vol.8]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 656 p. (Rus).
6. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: Low electrical conductance metals. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.5, pp. 40-44. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07.
7. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Calculation of fields and currents in the induction system with the attractive screen and the additional coil as a tool for the straightening. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 57-62. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.1.11.
8. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.5, pp. 35-39. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.05.
9. Gnatov A., Argun S. New method of car body panel external straightening: tools of method. *International Journal of Vehicular Technology*, 2015, vol.2015, pp. 1-7. doi: 10.1155/2015/192958.
10. Hnatov A., Arhun S., Dziubenko O., Ponikarovska S. Choice of electric engines connection circuits in electric machine unit of electric power generation device. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 2018, vol.12, no.4, pp. 85-93.

*Поступила (received) 19.04.2019*

Батыгин Юрий Викторович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Чаплыгин Евгений Александрович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
 Шиндерук Светлана Александровна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
 Стрельникова Виктория Анатольевна<sup>1</sup>, аспирант,  
<sup>1</sup> Харьковський національний автомобільно-дорожній  
 університет,  
 61002, Харків, ул. Ярослава Мудрого, 25,  
 тел/phone +380 57 7003852,  
 e-mail: yu.v.batygin@gmail.com; chaplygin.e.a@gmail.com;  
 s.shinderuk.2016102@ukr.net; v.strelnikova91@gmail.com

Yu.V. Batygin<sup>1</sup>, E.A. Chaplygin<sup>1</sup>, S.A. Shinderuk<sup>1</sup>, V.A. Strelnikova<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University,  
 25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

### Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 2: High electrical conductance metals.

**Purpose.** The purpose of the present work is substantiating workability of the linear tools of the magnetic-pulse attraction of thin-walled sheet metals with high electrical conductance, the principle of which is based on the force interaction of two conductors with unidirectional currents during intensive penetration of the acting electromagnetic fields. Constructively, one of these conductors in the linear tools is the so-called main current lead (an analog of the inductor in EMF) and the second one is the part of the sheet metal which has to be deformed. **Methodology.** For numerical estimates the analytical dependences are obtained with help of the methods of electromagnetic field theory as well the standard programs from the Wolfram Mathematica package used. **Results.** The fulfilled calculations illustrate the amplitude-temporal dependences for the excited currents and forces under the demanded decrease of the operating frequencies of the acting electromagnetic fields. The efficiency of the linear magnetic-pulse tools is based on the excitation of the mutual attraction forces of conductors with low-frequency unidirectional currents. **Originality.** By the example of aluminum, which is the main raw material in modern aviation and automotive industry, it has been found that for processing the metals with high electrical conductance demand a significant decreasing operating frequencies, what is necessary for intensifying the penetration processes of acting fields and, accordingly, for exciting the real attractive forces. **Practical value.** The results of the work allow formulating the based recommendations for the creation and practical application of the linear magnetic-pulse attraction tools for the progressive technologies of restoring the damaged areas of bodies coatings from the thin-walled sheet metals with the high specific electrical conductivity. References 10, figures 4.

**Key words:** metals with high electrical conductance, intensive field penetration, magnetic-pulse attraction of conductors with unidirectional currents, linear tools for eliminating dents in body coatings.