

АНАЛИЗ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ С МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ ПРИВОДОМ

© 2015

Р.В. Меркулов, старший преподаватель*Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт, Невинномысск (Россия)*

Ключевые слова: высоковольтная импульсная сварка; магнитно-импульсный привод; цветные металлы; сварка в твердой фазе.

Аннотация: Целью работы является анализ процесса импульсной сварки высоковольтным разрядом конденсаторов с использованием магнитно-импульсного привода для получения соединений разнотолщинных и разнородных деталей.

Анализ процесса высоковольтной импульсной сварки осуществлялся на основе электродинамики, теории электроэрозионной обработки, дислокационной теории образования соединений в твердой фазе. Качество сварного соединения оценивалось по результатам испытаний на механическую прочность, термоциклированием, металлографическими исследованиями оптической и электроннолучевой микроскопии.

Обработка данных экспериментальных исследований технологического процесса, анализ выражения магнитного давления через параметры оборудования определили необходимость исследования характеристик переналаживаемого генератора импульсных токов. Определялась собственная и рабочая частота разрядного контура при подключении определенного числа секций с различными типами стандартных импульсных конденсаторов с использованием малоиндуктивных токоподводов. Регистрацию измерений собственных и рабочих параметров контура при подключении секций накопителя и индукционно-динамического привода производили с использованием современного цифрового оборудования.

В результате анализа высоковольтной импульсной сварки с магнитно-импульсным приводом установлено, что при использовании магнитно-импульсного привода с исходным зазором за счет изменения массы толкателя и величины зазора можно регулировать энерговыделение в зону сварки. Чем больше исходный зазор и масса подвижных элементов, тем больше доля теплового воздействия. При сварке крупногабаритных стержневых деталей ($d=15-20$ мм) необходимо использовать высокочастотные генераторы импульсов тока (собственной частотой более 50 кГц), обеспечивающих смену полярности дугового разряда и, как следствие, увеличение площади разогрева плоской детали за счет эффекта «магнитного дутья».

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении конструкций современной техники наряду с использованием традиционных способов их сварки требуется модернизация или разработка принципиально новых способов, обладающих более широкими возможностями. Особенно остро стоит вопрос о получении разнородных деталей. Получение таких соединений связано с различными условиями теплоотвода. Сложность представляет сварка цветных однородных и разнородных металлов [1; 2]. Конструктивные виды разнородных сварных соединений представлены на рисунке 1.

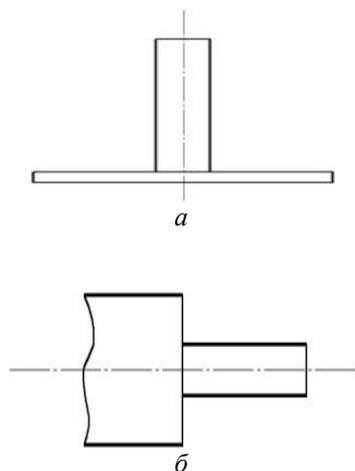


Рис. 1. Конструктивные виды разнородных соединений:
а – стержень – диск; б – стержни встык;
в – трубчатые детали или гайки полые с пластиной

На практике чаще всего встречаются соединения типа «стержень – диск». Для получения соединений «стержень – диск» необходимо использование импульсных процессов, сочетающих силовое и тепловое воздействия на соединяемые поверхности. Именно таким способом является высоковольтная импульсная сварка (ВИС) [1]. Для получения таких сварных соединений целесообразно использовать колебательный затухающий разряд. Он легко реализуется при разряде батарей конденсаторов на индуктивную нагрузку [2].

В статье представлены исследования процесса ВИС без формирования выступа с исходным зазором. При сварке цветных металлов сварное соединение должно быть получено в твердой фазе [3; 4].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения импульсной механической нагрузки в цепь генератора импульсных токов со свариваемыми деталями был последовательно включен магнитно-импульсный привод (МИП) [5–7].

Магнитно-импульсный привод состоит из плоского индуктора, поверх которого размещен толкатель. В процессе разряда батарей конденсаторов (рисунок 2) наводятся вихревые токи в толкателе. Взаимодействие вихревых токов в толкателе с магнитным полем индуктора приводит к возникновению магнитного давления тем самым механического воздействия на стержневой элемент [8].

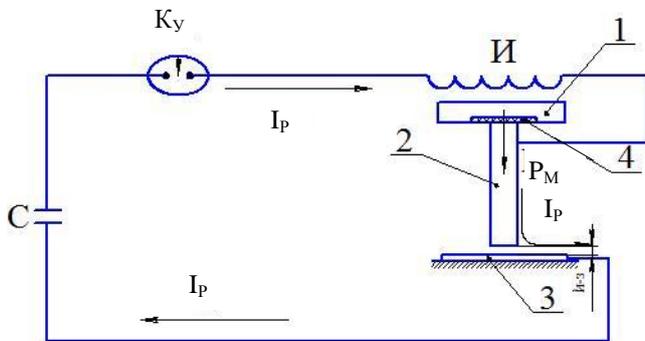


Рис. 2. Разрядный контур устройства ВИС с МИП:
 1 – толкатель; 2 – стержневой элемент;
 3 – пластина; 4 – диэлектрическая вставка;
 I_p – разрядный ток; P_M – магнитное давление;
 K_y – коммутирующее устройство;
 C – емкостный накопитель энергии

В процессе сварки выявлены энергетические и геометрические параметры [9], влияющие на качество получаемых сварных соединений: рабочее напряжение, $U=1\div 10000$ В; емкость накопительного блока, $C=12\div 2400$ Ф; число витков индуктора МИП, $N=3\div 10$ вт; диаметр стержня, $D_{cm}=4\div 25$ мм; частота разряда, $f=1000\div 20000$ Гц; масса толкателя, $M=0,5\div 2,0$ кг; диаметр индуктора, $D_u=50\div 250$ мм; скорость перемещения толкателя, $V_n=20\div 100$ м/с [10].

Параметры режимов ВИС с МИП были следующие: емкость накопительного блока $C=2400$ мкФ; число витков индуктора $N=7$ вт; толщина пластин $\delta_{II}=0,8$ мм; сплав ЛБ3; диаметр стержневого элемента $D_{cm}=10$ мм; масса толкателя $M=0,5$ кг; исходный зазор $\Delta=0,2\div 2$ мм [4].

Зависимости прочности сварного соединения от исходного зазора [4] при постоянной вводимой энергии $W=8100$ Дж и числе витков индуктора МИП $N=7$ вт для различных материалов приведены на рисунке 3.

Полученные сварные соединения были исследованы микроструктурным оптическим и электроннолучевым методами [11; 12].

Микроструктурные исследования образцов, полученных на рациональных режимах сварки, показали, что граница на участках соединения характерна для высокоскоростной сварки металлов в твердой фазе [13–15], имеется четкая линия раздела – зона «схватывания» (рисунок 4).

Микротвердость в зоне сварки повышена, что типично для классической магнитно-импульсной сварки и сварки взрывом [16; 17].

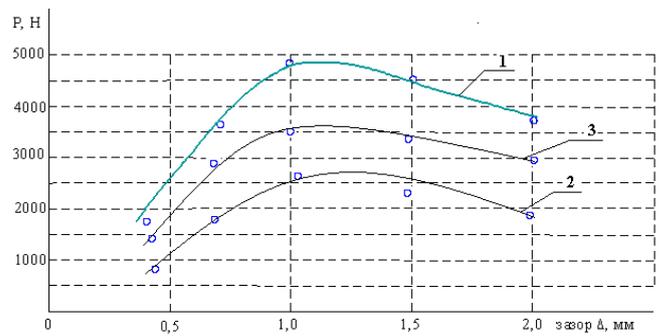


Рис. 3. Зависимость прочности сварного соединения от исходного зазора:

1 – сплав ЛБ3; 2 – сплав АМе6; 3 – сплав М1; $D_{cm}=10$ мм

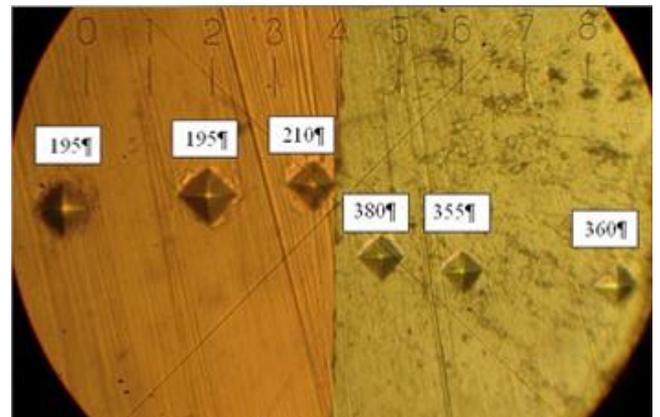


Рис. 4. Микроструктура зоны сварного соединения медного сплава М1 со сплавом ЛБ3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе проведенных экспериментальных исследований процесса высоковольтной импульсной сварки, теоретического анализа аналогичных разрядно-импульсных процессов, таких как ударная конденсаторная сварка, сварка взрывом, магнитно-импульсная сварка, выдвинута гипотеза о формировании соединения в процессе ВИС с МИП [18; 19]. Гипотеза позволила вскрыть механизм образования сварного соединения, который условно можно разбить на три стадии (рисунки 5, 6 и 7).

При сварке с исходным зазором (рисунок 5) за счет автоэлектронной эмиссии осуществляется пробой исходного зазора – цепь замыкается, возбуждается импульсная дуга [20].

Горение импульсной дуги на второй стадии (рисунок 6 а, б) обеспечивает оплавление стыкуемых поверхностей и электроэрозивную очистку – выплеск жидкого металла с загрязнениями за счет давления паров металла $P_{П.М}$ [20].

Протекание синусоидального тока обуславливает возникновение эффекта «магнитного дутья» [4], то есть отклонение импульсной дуги (рисунок 6 в, г) в различные периоды разряда тока, что позволяет увеличить площадь разогрева.

На третьей стадии [20] под действием магнитного давления происходит сближение очищенных поверхностей,

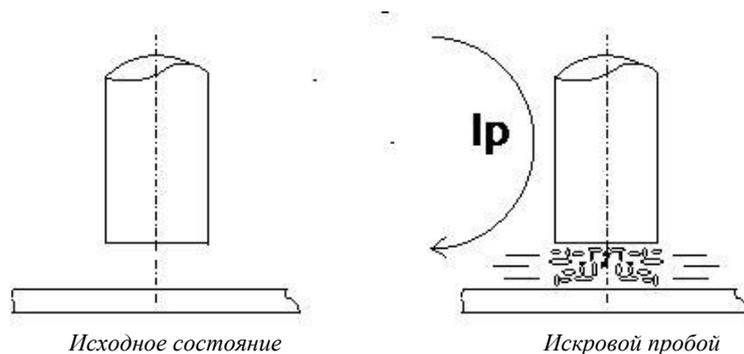


Рис. 5. Первая стадия процесса высоковольтной импульсной сварки с магнитно-импульсным приводом

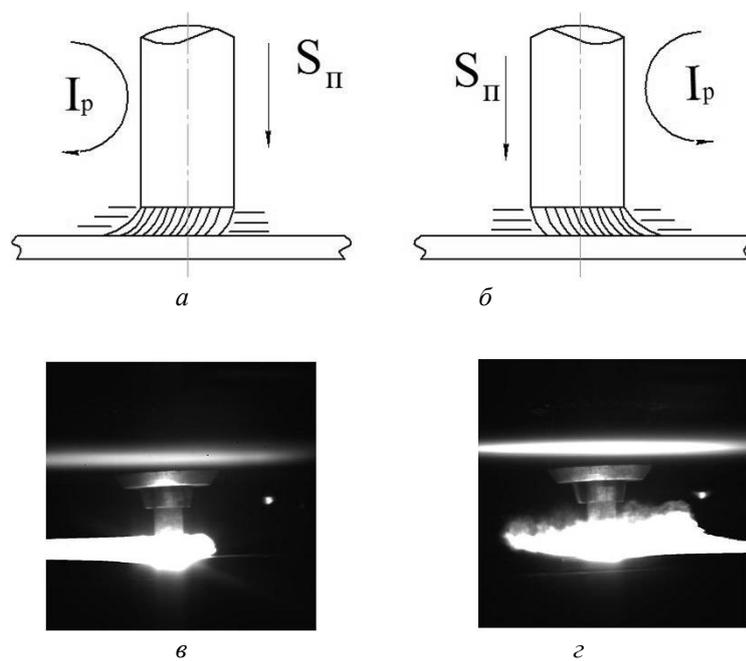


Рис. 6. Вторая стадия высоковольтной импульсной сварки с магнитно-импульсным приводом

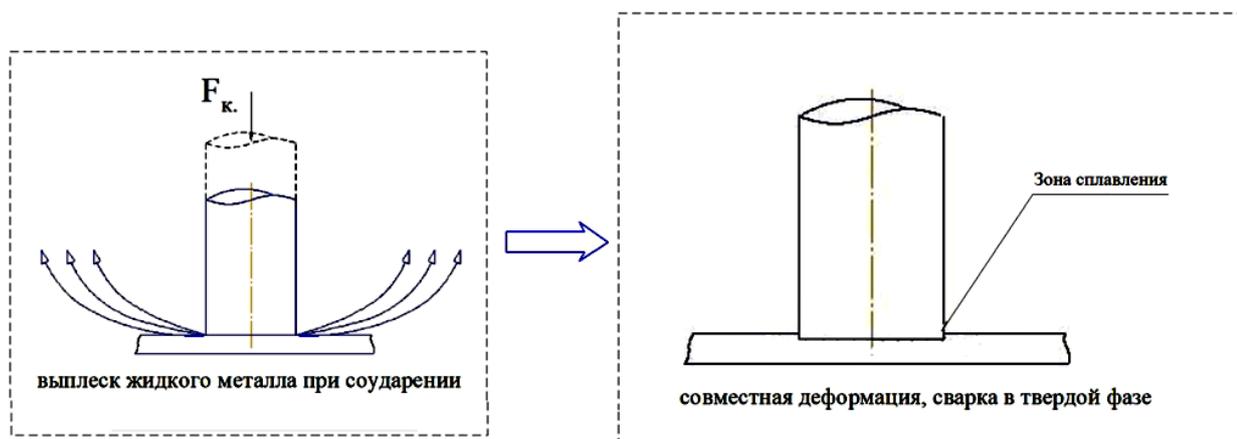


Рис. 7. Третья стадия процесса высоковольтной импульсной сварки с магнитно-импульсным приводом

выплеск жидкого металла при соударении, совместная деформация, образование сварного соединения в твердой фазе (рисунок 7).

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований [4] получения сварных соединений стержневых деталей с листовыми из цветных металлов и их сплавов в однородном и разнородном сочетаниях можно сделать вывод, что технологию сварки с исходным зазором целесообразно использовать для сварки разнородных цветных сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strizhakov E.L., Neskromnyi S.V., Merkulov R.V. Percussion capacitor discharge welding with a magnetic-pulsed drive // *Welding International*. 2010. Vol. 24. № 9. P. 718–720.
2. Нескоромный С.В., Стрижаков Е.Л. Специальные методы магнитно-импульсной сварки. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 152 с.
3. Конюшков Г.В., Мусин Р.А. Специальные методы сварки давлением. М.: Ай Пи Эр Медиа, 2009. 632 с.
4. Стрижаков Е.Л., Меркулов Р.В., Нескоромный С.В. Электроразрядные методы обработки. Невинномысск: Невинномысский гос. гуманитарно-техн. ин-т, 2014. 148 с.
5. Стрижаков Е.Л., Хахин Н.А., Бацемакин М.Ю., Хохлов Д.С. Установка для магнитно-импульсной обработки металлов : патент РФ № 2003108069/20; заявл. 27.03.03; опубл. 27.09.2003.
6. Стрижаков Е.Л., Евченко В.М., Плотников В.В. Исследование работы генератора импульсных токов для магнитно-импульсной сварки. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2001. 8 с.
7. Нескоромный С.В., Стрижаков Е.Л., Меркулов Р.В. Устройство для ударной конденсаторной сварки с магнитно-импульсным приводом : патент РФ № 96515; опубл. 10.08.2010.
8. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. Харьков: Вища школа, 1979. 198 с.
9. Ленивкин В.А., Стрижаков Е.Л. Электротехнологические процессы и оборудование. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2007. 283 с.
10. Меркулов Р.В., Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В. Высоковольтная импульсная конденсаторная сварка разнородных деталей // *Сварка и диагностика*. 2012. № 4. С. 43–46.
11. Меркулов Р.В. Высоковольтная конденсаторная сварка разнотолщинных деталей // *Современная техника и технология: исследования, разработка и их использование в комплексной подготовке специалистов : материалы III междунар. научно-практ. конф.* Невинномысск: НГГТИ, 2014. С. 326–330.
12. Нескоромный С.В., Меркулов Р.В., Сальник А.В. Исследования процесса ударной конденсаторной сварки с магнитно-импульсным приводом // *Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования : труды междунар. научно-техн. конф.* Самара: СГАУ, 2009. С. 158–162.
13. Дудин А.М. Магнитно-импульсная сварка металлов. М.: Энергия, 1979. 128 с.

14. Калеко Д.М., Моравский В.Э., Четверко Н.А. Ударная конденсаторная сварка. Киев: Наукова думка, 1984. 307 с.
15. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
16. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение-1, 2005. 495 с.
17. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
18. Стрижаков Е.Л., Бацемакин М.Ю., Нескоромный С.В. Гипотеза образования соединений и методы выбора и расчета параметров режимов и оборудования магнитно-импульсной сварки нахлесточных соединений // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион*. 2005. Спец. вып. С. 72–74.
19. Стрижаков Е.Л., Бацемакин М.Ю., Хохлов Д.С. Классификация приемов и исследование контактной магнитно-импульсной сварки // *Сварочное производство*. 2003. № 8. С. 11–14.
20. Стрижаков Е.Л., Яценко О.В., Плотников В.В., Юсупова Р.К. Основные стадии образования соединения в процессе сварки импульсными индуцированными токами с использованием магнитного давления // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2001. № 2. С. 21–22.

REFERENCES

1. Strizhakov E.L., Neskromnyi S.V., Merkulov R.V. Percussion capacitor discharge welding with a magnetic-pulsed drive. *Welding International*, 2010, vol. 24, no. 9, p. 718–720.
2. Neskromny S.V., Strizhakov E.L. *Spetsialnie metodi magnitno-impulsnoy svarki* [Special methods of magnetic pulse welding]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 152 p.
3. Konyushkov G.V., Musin R.A. *Spetsialnie metodi svarki davleniem* [Special methods of pressure welding]. Moscow, IPR Media publ., 2009, 632 p.
4. Strizhakov E.L., Merkulov R.V., Neskromny S.V. *Elektrozaryadnie metodi obrabotki* [Electrodischarge methods of treatment]. Nevinnomysk, Nevinnomyskiy gosudarstvenniy gumanitarno-tekhicheskiy institut publ., 2014, 148 p.
5. Strizhakov E.L., Khakhin N.A., Batsemakin M.Yu., Khokhlov D.S. *Ustanovka dlya magnitno-impulsnoy obrabotki metallov* [Machine for magnetic pulse treatment of metals]. Patent RF no. 2003108069, 2003.
6. Strizhakov E.L., Evchenko V.M., Plotnikov V.V. *Issledovanie raboti generatora impulsnikh tokov dlya magnitno-impulsnoy svarki* [Study of operation of pulse current generator for magnetic pulse welding]. Rostov-na-Donu, DGTU publ., 2001, 8 p.
7. Neskromny S.V., Strizhakov E.L., Merkulov R.V. *Ustroystvo dlya udarnoy kondensatornoy svarki s magnitno-impulsnim privodom* [Device for electrostatic percussion welding with magnetic pulse drive]. Patent RF no. 96515, 2010.
8. Mikhaylov V.M. *Impulsnie elektromagnitnie polya* [Pulsed electromagnetic fields]. Kharkov, Vishcha shkola publ., 1979, 198 p.
9. Lenivkin V.A., Strizhakov E.L. *Elektrotekhnologicheskie protsessy i oborudovanie* [Electrotechnology processes and equipment]. Rostov-na-Donu, DGTU publ., 2007, 283 p.

10. Merkulov R.V., Strizhakov E.L., Neskromniy S.V. High-voltage pulse electrostatic welding of different-type parts. *Svarka i diagnostika*, 2012, no. 4, pp. 43–46.
11. Merkulov R.V. High-voltage pulse electrostatic welding of parts of different thicknesses. *Materiali mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Sovremennaya tekhnika i tekhnologiya: issledovaniya, razrabotka i ikh ispolzovanie v kompleksnoy podgotovke spetsialistov"*. Nevinnomyssk, 2014, pp. 326–330.
12. Neskromniy S.V., Merkulov R.V., Salnik A.V. Study of the process of electrostatic percussion welding with magnetic pulse drive. *Trudi mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. "Metallofizika, mekhanika materialov, nonostruktur i protsessov deformirovaniya"*. Samara, SGAU publ., 2009, pp. 158–162.
13. Dudin A.M. *Magnitno-impulsnaya svarka metallov* [Magnetic pulse welding of metals]. Moscow, Energiya publ., 1979, 128 p.
14. Kaleko D.M., Moravsky V.E., Chvertko N.A. *Udarnaya kondensatornaya svarka* [Shock capacitor welding]. Kiev, Naukova dumka publ., 1984, 307 p.
15. Karakozov E.S. *Soedinenie metallov v tverdoy faze* [Solid phase metal joining]. Moscow, Metallurgiya publ., 1976, 264 p.
16. Lysak V.I., Kuzmin S.V. *Svarka vzrivom* [Explosion Welding]. Moscow, Mashinostroenie-1 publ., 2005, 495 p.
17. Karakozov E.S. *Svarka metallov davleniem* [Pressure welding of metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986, 280 p.
18. Strizhakov E.L., Batsemakin M.Yu., Neskromniy S.V. Hypothesis of joints formation and the methods of selection and calculation of modes parameters and equipment for magnetic pulse welding of lap joints. *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazsky region*, 2005, no. 5, pp. 72–74.
19. Strizhakov E.L. et al. Classification of methods and study of contact magnetic pulse welding. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2003, no. 8, pp. 11–14.
20. Strizhakov E.L. et al. Key steps of joint formation in the process of pulse induced current welding using magnetic pressure. *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazsky region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2001, no. 2, pp. 21–22.

THE ANALYSIS OF HIGH-VOLTAGE PULSE WELDING WITH THE MAGNETIC PULSE DRIVE

© 2015

R.V. Merkulov, senior lecturer

Nevinnomyssk State Institute of Humanities and Engineering, Nevinnomyssk (Russia)

Keywords: high-voltage pulse welding; magnetic pulse drive; nonferrous metals; solid phase welding.

Abstract: The goal of this work is to analyze the process of pulse high-voltage compensator discharge welding using the magnetic pulse drive to obtain the joints of heterogenic parts of different thickness.

The analysis of high-voltage pulse welding was carried out on the basis of electrostatics, the theory of electric erosion machining, and the dislocation theory of solid phase joints formation. The quality of welded joints was evaluated according to the results of mechanical performance tests, thermal cycling tests, metallographic examination of optical and electron-beam microscopy.

Experimental research data processing, the analysis of expression of magnetic pressure in terms of equipment parameters specified the necessity of research of characteristics of versatile surge-current generator. The author determined the natural and operating frequency of discharge circuit when connecting a certain number of sections with different types of standard pulse condensers using low-inductance tubes. Records of measurements of natural and operating circuit parameters when connecting accumulator and induction dynamic drive sections were carried out using modern digital equipment.

In the result of analysis of high-voltage pulse welding with magnetic pulse drive it was established that when using magnetic pulse drive with origin gap, it is possible to control energy input into welding area at the account of variation of push bar mass and the gap width. The more are the origin gap and the moving elements mass, the more is the thermal action quantity. When welding the large-sized core parts ($d=15-20$ mm), it is necessary to use high-frequency current pulse generators (with natural frequency of more than 50 kHz) ensuring arc discharge polarity inversion and, as a consequence, the extension of area of flat part heating at the account of the "magnetic blow" effect.