

О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ СВАРОЧНОЙ ЦЕПИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ СВАРОЧНОГО ТОКА

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В данной статье исследуется мало изученное влияние параметров сварочной цепи на амплитуду импульсов сварочного тока при импульсно-дуговой сварке (ИДС) плавящимся электродом в среде защитного газа. Сварочная цепь рассматривается как частотно-избирательная система, которая пропускает импульсы в неискаженном виде лишь в определенной полосе частот. Вне этой полосы импульсы в значительной степени подавляются, что может привести к резкому снижению эффективности ИДС. Основной целью статьи является определение ширины полосы пропускания сварочной цепи и возможность ее увеличения. В рамках разработанной математической модели получен критерий, устанавливающий в алгебраической форме одно из необходимых условий эффективного использования ИДС. С практической точки зрения этот критерий позволяет по известным параметрам сварочной цепи довольно просто оценить верхнюю границу полосы пропускания, внутри которой гарантируется заданная амплитуда импульсов сварочного тока. С другой стороны, указанный критерий может быть использован и для решения обратной задачи: по заранее выбранной частоте следования импульсов сварочного тока определить допустимые значения некоторых параметров сварочной цепи. Кроме того, в силу свой «аналитичности» указанный критерий может оказаться полезным при теоретических исследованиях импульсно-дуговых процессов, протекающих в сварочной цепи. Библиогр. 19, рис. 5.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, плавящийся электрод, сварочная цепь, амплитуда сварочного тока, частота следования импульсов, математическая модель

Одной из наиболее эффективных сварочных технологий, разработанных в еще в 1960-х годах и получившей затем дальнейшее развитие у нас и за рубежом [1–15], является импульсно-дуговая сварка (ИДС) плавящимся электродом в среде защитных газов. Повышенный интерес к ее использованию в последнее время в немалой степени связан с роботизацией дуговой сварки и с поступлением в промышленность более совершенного сварочного оборудования, в том числе импульсных источников сварочного тока. Эти источники характеризуются новыми возможностями в управлении режимами сварки и, в частности, возможностью программно задавать амплитуду тока в импульсе, длительность импульса, базовый ток и частоту следования импульсов. При определенном сочетании указанных параметров достигается, как известно, оптимальный перенос электродного металла в процессе ИДС.

Проблемам стабилизации, адаптивному управлению и практической реализации ИДС посвящено много публикаций [4, 6, 8, 9]. Но в то же время почти не освещен в литературе чрезвычайно важный вопрос, связанный с влиянием параметров сварочной цепи на формирование самих импульсов сварочного тока. Дело в том, что сварочная цепь в динамическом отношении представляет собой частотно-избирательную систему, которая пропускает импульсы в неискаженном виде лишь в определенной полосе частот [12]. Вне этой полосы импульсы будут в значительной степени по-

давляться, что может привести к резкому снижению эффективности ИДС.

Между тем неизвестно какова ширина указанной полосы частот и как она зависит от параметров сварочной цепи, каковы возможности ее расширения. Ответ на эти вопросы представляется весьма важным с практической точки зрения, поскольку они могут дать ясное представление о реальных частотных ограничениях, обусловленных динамическими свойствами сварочной цепи, которые необходимо учитывать при разработке импульсно-сварочных технологий и соответствующего оборудования. Данная статья как раз и посвящена решению этих вопросов.

Математическая модель. Рассмотрим схему сварочной цепи, изображенную на рис. 1. Динамические процессы, протекающие в ней, подчиняются уравнениям

$$\left. \begin{aligned} (L_1 + L_2) \frac{di}{dt} + (R_1 + R_2)i &= u_s(t) - u_a(i, l), \\ u_a(i, l) &= u_0 + El + S_a i, \\ l &= H - h, \\ h &= h_0 + v e^{-M \int_0^t idt}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В этих уравнениях и на рис. 1 приняты следующие обозначения: $i = i(t)$ — сварочный ток; $L_1, R_1, u_s(t)$ — индуктивность, внутреннее сопротивление и импульсное напряжение источника сварочного тока (ИСТ); L_2 — индуктивность сварочного контура, образованного подводящими

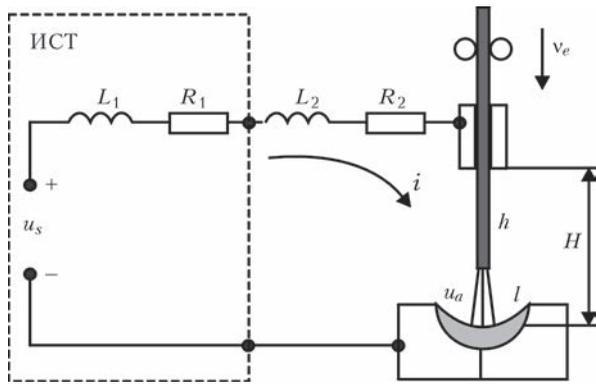


Рис. 1. Обобщенная схема сварочной цепи

проводами; R_2 — суммарное сопротивление вылета электрода, подводящих проводов и скользящего контакта в мундштуке горелки; $u_a = u_a(l, t)$ — напряжение на дуге; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжения; $l = l(t)$ — длина дуги; $S_a = \partial u_a / \partial i$ — крутизна вольт-амперной характеристики дуги; $E = \partial u_a / \partial l$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; H — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны; h_0 и $h = h(t)$ — начальное и текущее значение вылета электрода; v_e — скорость подачи электрода; $M = \partial v_m / \partial i$ — крутизна токовой характеристики плавления электрода; $v_m = v_m(t)$ — скорость плавления электрода; t — текущее время.

Исключив переменные $u_a(l, t)$, $l(t)$ и $h(t)$ из системы уравнений (1) и полагая, что $v_e = \text{const}$ и $H = \text{const}$, получим одно дифференциальное уравнение

$$L_* \frac{d^2 i}{dt^2} + R_w \frac{di}{dt} + EMi = Ev_e + \frac{du_s}{dt}, \quad (2)$$

в котором $L_* = L_1 + L_2$, $R_w = R_1 + R_2 + S_a$.

Уравнение (2) является упрощенной математической моделью сварочной цепи. При ее построении предполагалось, что возможные флуктуации параметров R_w и E в процессе дуговой сварки незначительны по сравнению с изменением переменных $u_s(t)$ и $i(t)$ и их можно не учитывать. Кроме того, не учитывались так называемые малые параметры [16], влиянием которых при решении данной задачи также можно пренебречь.

Запишем уравнение (2) в операторной форме

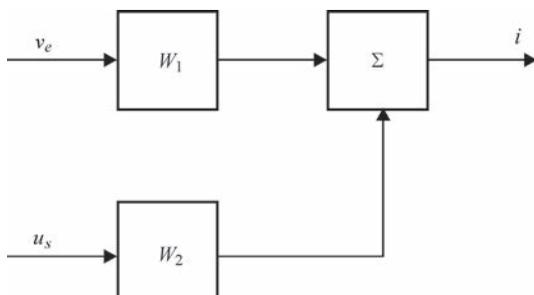


Рис. 2. Структурная схема сварочной цепи

$$(L_* p^2 + R_w p + EM)i = Ev_e + pu_s,$$

и для наглядности сопоставим этому уравнению структурную схему, приведенную на рис. 2.

На этой схеме

$$W_1 = W_1(p) = \frac{E}{L_* p^2 + R_w p + EM}, \quad (3)$$

$$W_2 = W_2(p) = \frac{p}{L_* p^2 + R_w p + EM} \quad (4)$$

передаточные функции от входов v_e и u_s к выходу i (p — оператор Лапласа). Из схемы и выражений (3), (4) видно, что сварочная цепь в структурном отношении представима в виде суммы двух элементарных звеньев, первое из которых соответствует фильтру низших частот, а второе — полюсовому фильтру [17].

Входным воздействием звена W_1 является скорость подачи электродной проволоки v_e , которая в нашем случае постоянна. Установившаяся реакция W_1 согласно (3) будет также постоянной и равной $i_\infty(t) = v_e / M$. На вход звена W_2 подается воздействие $u_s(t)$ в виде последовательности прямоугольных импульсов. Амплитуда импульсов на выходе W_2 в этом случае равна амплитуде входных импульсов, умноженной на значения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $A_2(\omega) = |W_2(j\omega)|$, где $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$, а f — частота следования импульсов.

Таким образом, для оценки реакции сварочной цепи на воздействие, являющееся периодической функцией времени $u_s(t)$, необходимо располагать АЧХ этой цепи. Ее можно построить по формуле

$$A_2(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{(EM - L_* \omega^2)^2 + R_w^2 \omega^2}}, \quad (5)$$

которая выводится после подстановки в выражение (4) мнимой переменной $j\omega$ вместо оператора p [18].

На рис. 3 показан график АЧХ звена W_2 . На этом же рисунке проведена горизонтальная штриховая линия на уровне $\max A_2 / \sqrt{2}$, что соответствует значению -3дБ .

Точки пересечения этой линии с графиком $A_2(\omega)$ задают полосу пропускания $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ сварочной цепи. Очевидно, что чем шире $\Delta\omega$, тем на более высокой частоте следования импульсов $f = \omega / 2\pi$ можно осуществлять ИДС с заданной амплитудой этих импульсов.

Рассмотрим, какие существуют реальные возможности расширения полосы $\Delta\omega$. Анализ выражения (5) показывает, что параметры R_w и L_* , входящие в это выражение, в отличие от E и M ,

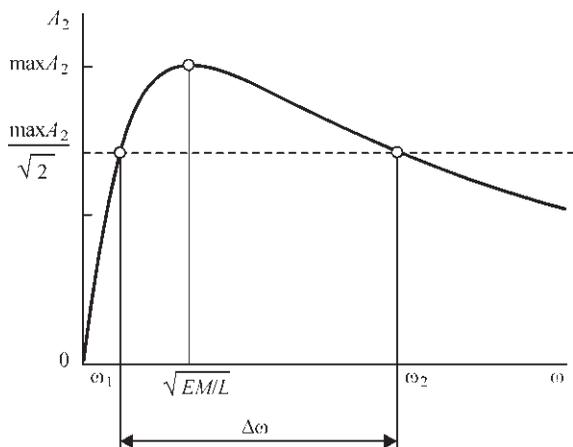


Рис. 3. АЧХ полосового фильтра W_2

могут быть использованы для расширения полосы $\Delta\omega$. Очевидно, что суммарное сопротивление $R_w = R_1 + R_2 + S_a$ может быть изменено лишь за счет изменения основного слагаемого R_1 , которое задает наклон вольт-амперной характеристики ИСТ. Но эта характеристика не может быть изменена произвольным образом. Иначе дело обстоит с индуктивностью сварочной цепи L_* . Ее изменение допустимо, как известно, в достаточно широком диапазоне без существенного ухудшения качества самой сварки [19].

Таким образом, практически существует лишь одна возможность значительного расширения $\Delta\omega$ – это уменьшение индуктивности сварочной цепи L_* . Чтобы проиллюстрировать эту возможность, построим (рис. 4) нормированные АЧХ

$$A_{2N}(\omega) = \frac{A_2(\omega)}{\max A_2(\omega)} = \frac{R_* \omega}{\sqrt{(EM - L_* \omega^2)^2 + R_w^2 \omega^2}} \quad (6)$$

для двух различных случаев: когда $L_* = 0,5$ и когда $L_* = 0,05$ мГн. Значения остальных параметров сварочной цепи, входящих в формулу (6), являются типовыми: $E = 2$ В/мм, $M = 0,31$ мм/(А·с) и $R_w = 0,045$ Ом (эти значения взяты из работы [16]).

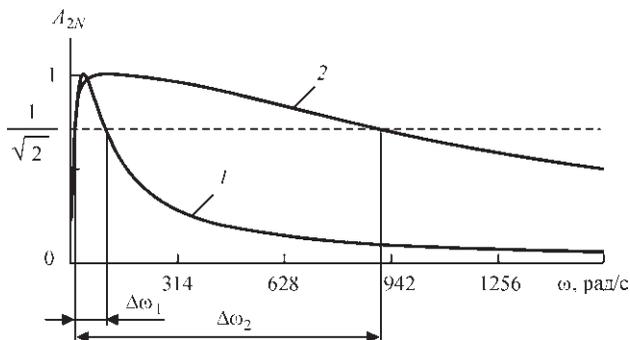


Рис. 4. Нормированные АЧХ звена W_2 (описание 1, 2 см. в тексте)

Из рис. 4 видно, что в первом случае полоса пропускания сварочной цепи $\Delta\omega_1$ весьма узкая: $\Delta\omega_1 = 91$ рад/с (что соответствует $\Delta f_1 = 14,5$ Гц). Во втором случае полоса частот значительно шире: $\Delta\omega_2 = 911$ рад/с или $\Delta f_2 = 145$ Гц. Очевидно, дальнейшее уменьшение индуктивности L_* приведет к еще большему расширению полосы частот сварочного контура.

Естественно, возникает вопрос: нельзя ли найти зависимость частоты следования импульсов сварочного тока f непосредственно от индуктивности L_* в аналитическом виде, не прибегая к графическому построению АЧХ. Рассмотрим уравнение $A_{2N}(\omega) = 1/\sqrt{2}$, которое с учетом (6) запишем следующим образом:

$$\frac{R_w \omega}{\sqrt{(EM - L_* \omega^2)^2 + R_w^2 \omega^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Это уравнение разбивается на два квадратных уравнения:

$$L_* \omega^2 + R_w \omega - EM = 0, \quad \text{если } \omega < \sqrt{\frac{EM}{L_*}},$$

$$L_* \omega^2 - R_w \omega - EM = 0, \quad \text{если } \omega > \sqrt{\frac{EM}{L_*}}.$$

Так как нас интересует верхняя граница полосы пропускания ω_2 (см. рис. 3), т.е. случай, когда $\omega > \sqrt{EM/L_*}$, то будем рассматривать лишь второе из приведенных уравнений. Этому уравнению удовлетворяет решение

$$\omega_2 = \frac{R_w}{2L_*} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4L_* EM}{R_w^2}} \right) \quad (7)$$

Принимая во внимание, что в большинстве практических случаев при ИДС

$$L_* \ll \frac{R_w^2}{4EM}, \quad (8)$$

выражение (7) существенно упрощается и принимает вид

$$\omega_2 \approx \frac{R_w}{L_*},$$

или (с учетом того, что $\omega_2 = 2\pi f_2$)

$$f_2 \approx \frac{R_w}{2\pi L_*}.$$

Таким образом, если выполняется условие $f < f_2$, т.е. если

$$f < \frac{R_w}{2\pi L_*}, \quad (9)$$

то частота следования импульсов сварочного тока f не выходит за пределы полосы пропускания сварочной цепи. А это означает, что уменьшение амплитуды импульсов в этом случае не будет превышать заданного допуска $\Delta A = 3$ дБ.

Следовательно, неравенство (9) можно рассматривать как одно из необходимых условий эффективного использования ИДС. Это неравенство из-за своей простоты весьма удобно для предварительного расчета f . Замечательно также и то, что оно в силу своей «аналитичности» может оказаться полезным при теоретических исследованиях импульсно-дуговых процессов, протекающих в сварочной цепи.

Результаты вычислительного эксперимента.

С целью проверки влияния индуктивности L_* на амплитуду импульсов сварочного тока был в рамках математической модели (2) проведен вычислительный эксперимент. При этом использовались те же ее параметры, которые применялись при построении АЧХ. Кроме того, задавались параметры режима роботизированной ИДС: $v_e = 22$ мм/с, $H = 17$ мм, длительность импульсов $\tau = 0,004$ с, $u_s(t) = (30 + 10z(t))$ В, где

$$z(t) = \begin{cases} 1, & nT \leq t \leq (nT + \tau), \\ 0, & (nT + \tau) < t < (n+1)T, \end{cases}$$

$$T = 1/f, n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Частота следования импульсов f была выбрана равной 25 имп/с. Этот выбор сделан с таким расчетом, чтобы ее значение оказалось внутри полосы пропускания $\Delta f_2 \approx 145$ Гц ($\Delta\omega_2 = 911$ рад/с), но, в то же время (см. рис. 4), вне полосы пропускания $\Delta f_1 \approx 14,5$ Гц ($\Delta\omega_1 = 91$ рад/с).

Результаты эксперимента представлены на рис. 5 в виде реакции сварочного тока $i(t)$ на воздействие $v_e = \text{const}$ и последовательность прямоугольных импульсов $u_s(t)$.

Сравнение этих результатов показывает, что при $L'_* = 0,05$ мГн (рис. 5, а) импульсы сварочного тока имеют достаточно большую амплитуду. Это объясняется тем, что $f < f_2$ и сварочная цепь как полосовой фильтр не оказывает в этом случае существенного влияния на амплитуду импульсов. При $L''_* = 0,5$ мГн импульсы сварочного тока (рис. 5, б), как и следовало ожидать, существенно подавлены сварочной цепью, так как в этом случае $f > f_2$.

Выводы

Проведенное исследование показывает, что параметры сварочной цепи, в частности, индуктивность L_* , оказывают существенное влияние на характеристики импульсов сварочного тока. Влияние индуктивности L_* на скорость нарастания и скорость снижения сварочного тока в импульсе

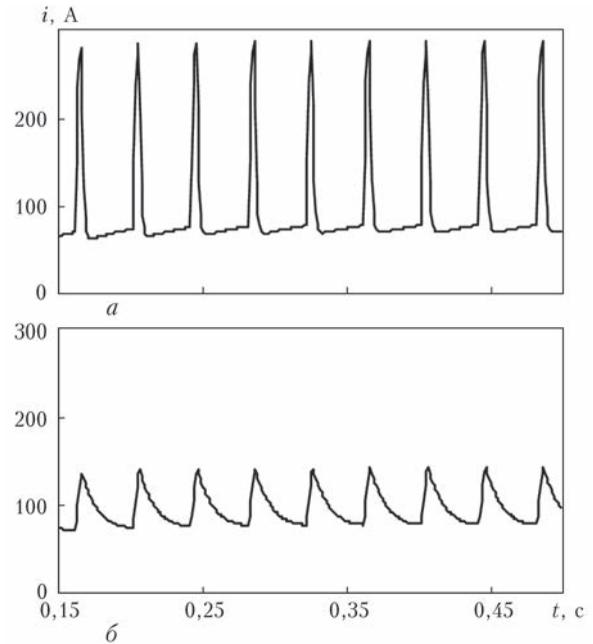


Рис. 5. Импульсы сварочного тока при различных значениях L_* : а — $L'_* = 0,05$; б — $0,5$ мГн

хорошо известно специалистам, занимающимся проблемами ИДС. Однако до сих пор оставалось не до конца ясным, какова степень ее влияния на амплитуду этих импульсов. В результате исследования показано, что сварочная цепь как динамическая система характеризуется определенной полосой пропускания импульсов сварочного тока. Если частота следования импульсов выходит за пределы этой полосы, амплитуда импульсов резко уменьшается, что может отрицательно сказаться на эффективности ИДС.

В данной статье получено соотношение (9), устанавливающее в алгебраической форме связь между частотой следования импульсов сварочного тока f и параметрами сварочной цепи R_w и L_* . Это соотношение позволяет по известным параметрам R_w и L_* довольно просто оценить верхнюю границу полосы пропускания конкретной сварочной цепи, внутри которой гарантируется необходимая амплитуда импульсов сварочного тока. Очевидно, что соотношение (9) дает возможность решать и обратную задачу: по заранее выбранной частоте следования импульсов f и по известному значению R_w определить границу допустимых значений индуктивности сварочной цепи L_* .

1. Патон Б. Е. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса / Б. Е. Патон, А. Г. Потапьевский, Н. В. Подола // Автоматическая сварка. — 1964. — № 1. — С. 1–6.
2. Amin M. Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding / M. Amin // The Paton Welding Journal. — 1983. — № 5. — P. 272–278.
3. Matsunava A. Pulsed Arc Welding / A. Matsunava, H. Yamamoto, S. Hiramoto // Journal of The Japan Welding Society. — 1984. — Vol. 53, № 6. — P. 20–58.
4. Шейко П. П. Источник питания для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом с плавным регулирова-

- нием параметров / П. П. Шейко, В. М. Павшук // Автоматическая сварка. – 1992. – № 6. – С. 44–46.
5. Сараев Ю. Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки / Ю. Н. Сараев. – Новосибирск: Наука, 1994. – 108 с.
 6. Воропай Н. М. Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов (Обзор) / Н. М. Воропай, В. М. Илюшенко, Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. – 1999. – № 6. – С. 26–32.
 7. Судник В. А. Математическая модель источника теплоты при дуговой сварке плавящимся электродом в смеси защитных газов. Ч. 2. Импульсный процесс / В. А. Судник, А. В. Иванов, У. Дилтей // Сварочное производство. – 2000. – № 9. – С. 9–15.
 8. Сараев Ю. Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов / Ю. Н. Сараев // Сварочное производство. – 2002. – № 1. – С. 4–11.
 9. Стабилизация процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Б. Е. Патон, П. П. Шейко, А. М. Жерносеков [и др.] // Автоматическая сварка. – 2003. – № 8. – С. 3–6.
 10. Дюргеров Н. Г. Определение свойств дуги при импульсных процессах сварки / Н. Г. Дюргеров, Д. Х. Сагиров // Сварочное производство. – 2004. – № 4. – С. 14–18.
 11. Nong H. Solutions to Problems of Tine Spatter and Arc Pulsed MIG Arc Welding / H. Nong, T. Ueyama // Quarterly Journal of Japan Welding Society. – 2004. – Vol. 22, № 2. – P. 249–247.
 12. Цыбулькин Г. А. Влияние частотных свойств сварочного контура на параметры тока при импульсно-дуговых процессах сварки / Г. А. Цыбулькин // Автоматическая сварка. – 2005. – № 10. – С. 11–15.
 13. Исследование процесса переноса электродного металла при импульсном питании сварочной дуги / А. Ф. Князьков, Н. Ю. Крампит, А. Г. Крампит [и др.] // Технология металлов. – 2005. – № 7. – С. 18–21.
 14. Крампит Н. Ю. Исследование процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа / Н. Ю. Крампит, А. Г. Крампит // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 106–111.
 15. Дюргеров Н. Г. Технологическая стабильность импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Н. Г. Дюргеров, В. А. Ленивкин // Сварочное производство. – 2015. – № 2. – С. 3–7.
 16. Цыбулькин Г. А. Адаптивное управление в дуговой сварке / Г. А. Цыбулькин. – К.: Сталь, 2014. – 171 с.
 17. Гутников В. С. Фильтрация измерительных сигналов / В. С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
 18. Макаров И. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал) / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с.
 19. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 330 с.

Поступила в редакцию 15.03.2016

XV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2016

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ

22–25
НОЯБРЯ

 МЕТАЛЛО-ОБРАБОТКА
МЕТАЛЛОПРОЦЕССОРЫ
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ

 УКРАИНА ITEX
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

 УКРСТОП ITEX
КУРСОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ВИСВІТЛЮВАЧ

 УКРФАСТ ITEX
БЕЗПЕЧНІСТЬ І ТЕХНОЛОГІЯ РОБОТОТЕХНІКА

 ГІДРАВЛІКА ITEX
ІНЖЕНЕРІНГ

 ВОДОПРОБНИКИ ITEX
ІНЖЕНЕРІНГ

 УКРЧИМ ITEX
ПРОМЫШЛЕННА ХІМІЯ

 УКРСЧЕП ITEX
ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ КАБЕЛІВ

 ОБРАБОТКА, СТАНДАРТЫ, ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ ITEX
КОМПЬЮТЕРІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ
РОБОТОТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЯ
ОБРОБКИ МЕТАЛОПІСЬОМ
ОБРОБКА МЕТОДОМ СЕРВІСІНГ

 ВИДЕЛЬНО-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДИСКЕ ОБУРОБІВАННЯ ITEX
ОБРОБКА ІНЖЕНЕРІНГ

 БЕЗПЕЧНОСТ ITEX
ОЦІНКА ШКОДИ
ВІСНОУВАЖЛИВОСТІ
НАБЕЛІВ

 УКРИЛІТЕ ITEX
ІНЖЕНЕРІНГ




ОРГАНИЗАТОР:
Международный выставочный центр

Генеральный
информационный партнер:



Технический
партнер:





Международный выставочный центр
Украина, 02660, Киев
Броварской пр-т, 15
М "Левобережная"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56
e-mail: maria@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr
www.tech-expo.com.ua