



ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, И. В. ПЕНТЕГОВ, доктора техн. наук, **Е. П. СТЕМКОВСКИЙ, Д. А. ШЕЙКОВСКИЙ, В. М. КИСЛИЦЫН**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен метод расчета режимов магнитно-импульсной сварки, сочетающий аналитический способ расчета и числовые методы с использованием ПЭВМ. Применение данного метода расчета позволяет с достаточной точностью для практики рассчитывать параметры магнитно-импульсной сварки и выбирать оптимальные режимы сварки.

Ключевые слова: магнитно-импульсная сварка, метод расчета, оптимальные режимы сварки

Магнитно-импульсная сварка (МИС) основана на преобразовании части электрической энергии заряда батареи конденсаторов в механическую, причем импульс давления при воздействии магнитного поля прикладывается к деталям без какой-либо промежуточной среды. Образование сварного соединения при МИС характеризуется интенсивным протеканием процессов взрывного типа.

При МИС в течение короткого промежутка времени происходит разряд батареи конденсаторов на индуктор, генерация сильного электромагнитного поля и образование индуцированных полей вихревых токов в метаемой детали, взаимодействие этих полей и движение метаемой детали в направлении неподвижной трубы, соударение и сварка соединяемых поверхностей. Ввиду многообразия процессов, происходящих при МИС, рассчитывать оптимальные режимы сварки для конкретных деталей весьма затруднительно из-за сложности математического описания задач со многими параметрами и решения нелинейных уравнений.

В настоящее время в связи с совершенствованием ПЭВМ и наличием необходимого программного обеспечения в подобных сложных случаях целесообразно использовать аналитические методы анализа процессов в сочетании с численными методами расчета.

Цель настоящей работы — использовать преимущества такой методики на примере расчета процессов, происходящих при МИС труб.

Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай протекания электрического тока через массивный кольцевой индуктор, когда на последний разряжается предварительно заряженная батарея конденсаторов [1], что в настоящее время применяется во всех известных источниках питания для МИС. В источнике питания (рис. 1) имеется батарея конденсаторов C , значения емкости которой для конкретной сварочной машины постоянные. При сварке батарея конденсаторов C заряжается до номинального напряжения $U_{Cн}$, после чего через коммутатор K разряжается на индуктор.

Значения $U_{Cн}$ можно изменять в широких пределах.

При МИС используют колебательный режим разряда батареи конденсаторов. Закон изменения разрядного тока в этом случае удобно записать в виде функции безразмерного параметра γ , как это приведено в работе [2]:

$$i(t) = \frac{2U_{Cн}}{\gamma R} e^{-\delta t} \sin \omega t; \quad \gamma = \sqrt{\frac{4L}{CR^2} - 1};$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \delta \gamma; \quad \delta = \frac{R}{2L}.$$

Параметры разрядного контура машины C , R и L принимают постоянными во времени и неизменными в процессе сварки. Для параметра L это условие выполняется при сварке труб малого диаметра, когда суммарная индуктивность разрядного контура меняется незначительно за время пролета $t_{пр}$ метаемой трубы. Полагаем также, что начало движения детали (трубы) практически совпадает с началом импульса тока (момент времени $t = 0$).

Максимальный ток разряда определяется по формуле

$$I_{max} = U_{Cн} \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\delta t_{max}}; \quad t_{max} = \frac{\text{arctg } \gamma}{\omega},$$

где t_{max} — время достижения максимального тока.

Следует отметить, что максимальная скорость нарастания разрядного тока наблюдается в начале

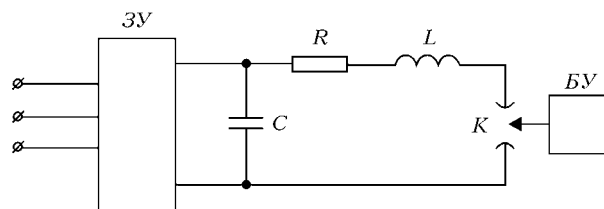


Рис. 1. Электрическая схема источника питания для МИС: ЗУ — зарядное устройство; R — активное сопротивление разрядного контура, включающее сопротивление метаемой трубы; L — индуктивность разрядного контура, включающая индуктивность магнитно-связанных индуктора и свариваемых деталей; БУ — блок управления (остальные обозначения см. в тексте)

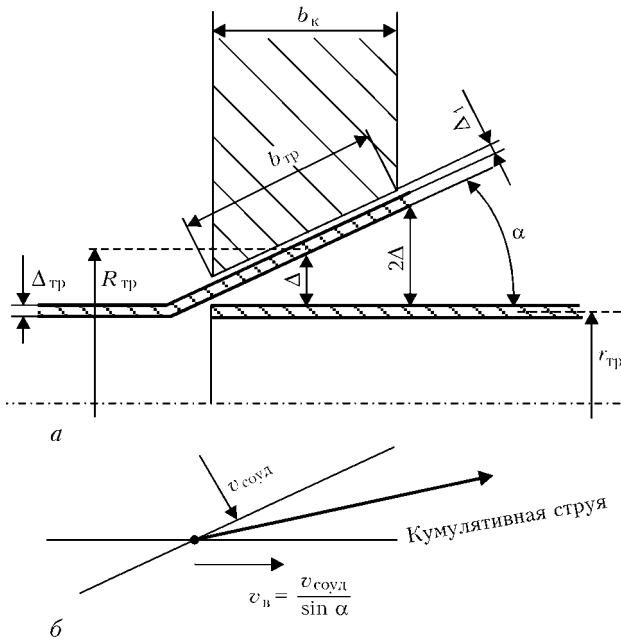


Рис. 2. Схемы реализации МИС при метании деформируемого участка трубы (а) и возникновения кумулятивной струи (б): $r_{тр}$ — средний радиус исходной трубы-заготовки; $R_{тр}$ — средний радиус развальцованного участка метаемой трубы в зоне сварки; $\Delta_{тр}$ — толщина стенки метаемой трубы; Δ — среднее значение зазора между соединяемыми трубами; Δ_1 — среднее значение зазора между индуктором-концентратором и трубой; α — угол развальцовки трубы; $b_{тр}$ — ширина нахлеста (остальные обозначения см. в тексте)

разряда батареи конденсаторов, когда $(di/dt)_{max} = U_{Cн}/L$ [3].

На рис. 2 приведены схемы процесса МИС при метании деформируемого участка трубы.

Обычно индуктор-концентратор с шириной рабочего участка b_k имеет конусность с тем же углом α . С учетом выражения $\Delta = (b_{тр}/2)\sin \alpha$ средний радиус трубы после развальцовки определяется по формуле

$$R_{тр} = r_{тр} + \Delta + \Delta_{тр} = r_{тр} + (b_{тр}/2)\sin \alpha + \Delta_{тр}. \quad (1)$$

Из выражения (1) выводим коэффициент $k_{тр}$, учитывающий изменение радиуса метаемой трубы после развальцовки:

$$k_{тр} = (R_{тр}/r_{тр}) = 1 + [(\Delta + \Delta_{тр})/r_{тр}].$$

На практике для расчетов режимов сварки используют в качестве заданных рекомендуемые диапазоны значений некоторых параметров, которые получают экспериментально для различных металлов: это фронтальная скорость соударения $v_{соуд}$, скорость движения волны соударения (точки схождения) v_n и угол соударения α трубы [1]. Если для данного соединения обеспечить достижение этих параметров путем изменения электрических параметров силового контура машины для МИС, можно гарантировать стабильное воспроизведение процесса сварки.

Рассмотрим процессы, происходящие при разряде батареи конденсаторов на электромагнитный индуктор в случае МИС. Масса метаемого развальцованного участка трубы составляет

$$m = 2\pi r_{тр} \Delta_{тр} \gamma_{тр} b_k,$$

где $\gamma_{тр}$ — удельная масса материала метаемой трубы.

Площадь поверхности S воздействия магнитного поля на метаемую трубу можно записать в следующем виде:

$$S = 2\pi R_{тр} b_{тр},$$

здесь и далее $b_{тр} = b_k / \cos \alpha$ (рис. 2).

Сила, приложенная к рабочему участку метаемой трубы в интервале времени пока не происходит просачивание магнитного поля через стенку трубы, определяется по формуле

$$F = SB^2 / \mu_0,$$

где B — среднее значение индукции магнитного поля в зазоре между индуктором и метаемой трубой; μ_0 — магнитная постоянная.

При этом ускорение метаемой детали в срединной ее части равно

$$a = F/m = B^2 / (\mu_0 \Delta_{тр} \gamma_{тр}) = [\mu_0 \omega^2 K_R^2 / \Delta_{тр} \gamma_{тр} b_{тр}^2] (k_{тр} / \cos \alpha) i(t)^2.$$

По закону полного тока

$$B b_{тр} / (\mu_0 K_R) = i \omega,$$

где K_R — коэффициент Роговского, $K_R = 1 - \frac{\Delta_1}{\pi b_{тр}} (1 - \exp[-\pi(b_{тр})/\Delta_1])$; i — ток, протекающий через индуктор; ω — количество витков индуктора (в нашем случае $\omega = 1$).

Отсюда определяется индукция в рабочей зоне:

$$B(t) = (\mu_0 \omega K_R / b_{тр}) i(t).$$

Текущая скорость метаемой трубы в срединной ее части находится по формуле

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt,$$

а скорость метаемой трубы в ее срединной части в момент соударения составляет

$$v_{соуд} = \int_0^{t_{ип}} a(t) dt = \frac{\omega^2 \mu_0 K_R^2}{b_{тр}^2 \Delta_{тр} \gamma_{тр}} \frac{k_{тр}}{\cos \alpha} \int_0^{t_{ип}} i(t)^2 dt.$$

В этот момент скорость соударения должна быть такой, чтобы удовлетворять значению этого параметра, полученного экспериментальным путем для данного материала метаемой трубы [1].

Среднее время пролета трубы $t_{ип}$ определяем из следующего уравнения при условии, что путь, пройденный срединной частью метаемой трубы, равен среднему значению зазора Δ между соударяемыми трубами (рис. 2):

$$\Delta = \int_0^{t_{ип}} v dt = \frac{\omega^2 \mu_0 K_R^2}{\gamma_{тр}} \frac{k_{тр}}{\cos \alpha} \int_0^{t_{ип}} \left(\int_0^t i(t)^2 dt \right) dt. \quad (2)$$



Если известно значения Δ , то, решая уравнение (2), находим $t_{пр}$.

Для рассматриваемого случая уравнение (2) относительно $t_{пр}$ аналитическим путем не решается. Однако для конкретной задачи численным методом с помощью программы ПЭВМ, например MathCAD, среднее время пролета $t_{пр}$ метаемой трубы находится из уравнения

$$t_{пр} = \text{root} \left[\Delta - \frac{\mu_0 K_R^2}{b_{тр}^2 \Delta_{тр} \gamma_{тр}} \frac{k_{тр}}{\cos \alpha} \int_0^x \left(\int_0^t i(t)^2 dt \right) dt, x \right].$$

При известных значениях $t_{пр}$ для конкретной задачи можно определить необходимые расчетные параметры режима сварки.

Условная кинетическая энергия W_k (условность состоит в том, что на самом деле разные участки метаемой трубы соударяются с неподвижной трубой с разными скоростями и в разное время) при метаемой массе m составляет

$$W_k = (mv_{соуд}^2)/2. \quad (3)$$

Значения условного КПД сварочной цепи при сварке одной детали определяется из выражения

$$\eta = 2W_k / CU_C^2. \quad (4)$$

Скорость звука в жидкости (в гидродинамической ударной волне) для металла заготовки составляет

$$v_{зв} = (E_T / \gamma_{тр})^{1/2},$$

где E — модуль упругости свариваемого металла.

Скорость движения волны соударения v_b — точки скрещения при метании трубы под углом α (см. рис. 2) для получения качественной сварки должна быть меньше $v_{зв}$. Она определяется по формуле

$$v_b = v_{соуд} / \sin \alpha.$$

Как показала практика, для получения качественных сварных соединений способом МИС необходимо соблюдать определенные значения $v_{соуд}$ и v_b , приведенные в табл. 1 [1].

Исходя из существующих в настоящее время представлений [1] нижняя граница скорости соударения $v_{соуд}$ определяется условиями образования кумулятивной струи (см. рис. 2), причем при значении $v_{соуд}$ меньше значений нижней ее границы сварное соединение не образуется, а осуществляется только опрессовка деталей. При значениях скоростей соударения $v_{соуд}$ и волны соударения v_b , превышающих верхние границы (табл. 1), образуются дефекты сварного соединения. Это обусловлено следующими факторами: во-первых, возникновением разрывов и трещин в сваренном металле из-за воздействия мощных звуковых волн на сварной шов при скорости волны соударения, превышающей скорость звука; во-вторых, наличием в металле сварного соединения оксидных пленок и других примесей из-за того, что последние не успевают выйти из зоны сварки вместе с ку-

Таблица 1. Скорости соударения и волны соударения для различных материалов

Металл/сплав	$v_{соуд}$, м/с	v_b , км/с
Алюминий	240...380	1,90...2,58
Медь	450...480	1,59...1,97
Бронза	Около 400	2,12...3,24
Латунь	460...520	1,77...3,14

мулятивной струей вследствие «схлопывания» зазора между соединяемыми поверхностями труб. Среднее значение скорости соударения определяет среднее время пролета $t_{пр}$ метаемой трубы. При метании последней под углом α на участке шириной b_k будет наблюдаться некоторый интервал времени, в течение которого значения $v_{соуд}$ удовлетворяют условиям получения качественного сварного соединения, что определяет ширину сварного шва, выполненного способом МИС.

Для обеспечения высокого качества сварки необходимо также поддерживать определенное значение давление магнитного поля в момент соударения деталей (осадка). Мгновенное значение этого давления при сварке определяется из выражения

$$P(t) = B(t)^2 / \mu_0.$$

Давление магнитного поля в момент соударения деталей соответствует $t_{пр}$

$$P_{соуд} = P(t_{пр}).$$

Ниже приведены расчеты для двух конкретных режимов сварки алюминиевых труб. Заданными считаем геометрические параметры метаемой трубы и зоны сварки: ширину зоны сварки; средний зазор между внутренней трубой и метаемой заготовкой Δ ; зазор между индуктором и метаемой заготовкой Δ_1 ; толщину и радиус метаемой трубы $r_{тр}$ до развальцовки; угол соударения трубы α .

Известными полагаются некоторые физические параметры, характерные для процессов, происходящих при МИС, например абсолютная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, коэффициент Роговского K_R [4], плотность $\gamma_{тр}$ и удельное электрическое сопротивление металла трубы ρ , модуль упругости E [5].

Варьируемыми являются электрические параметры процесса — активное суммарное сопротивление разрядного контура R , суммарная индуктивность разрядного контура L (принимается в расчетах постоянной величиной, для случая, когда индуктивность зоны метаемой заготовки составляет незначительную долю от L), напряжение заряда накопителя U_C , энергия накопителя W_H , скорость нарастания тока в начале разряда di/dt . Параметры МИС рассчитывали и для случая использования одновиткового индуктора-концентратора.

Для этого проверяли выполнение неравенства

$$t_m = (\mu_0 \Delta_{тр} \Delta) / \rho > t_{пр},$$

где t_m — время проникновения магнитного поля сквозь метаемую трубу, а также соблюдения тре-



Таблица 2. Расчетные параметры МИС

Диаметр трубы, мм	W_n , кДж	$L \cdot 10^5$, мГн	R , мОм	C , мкФ	U_{C_n} , кВ	$\rho_{Al} \cdot 10^8$, Ом·м	$E_{Al} \cdot 10^{-9}$, Па	γ_{Al} , кг/м ³	di/dt , кА/м
12	1,30	3,0	2,60	100	5,1	3,4	65	2700	170
20	1,57	3,3	2,74	100	5,6	3,4	65	2700	170

Продолжение табл. 2

Диаметр трубы, мм	I_{max} , кА	B_{max} , Тл	$P_{сoud}$, Па	$v_{зв}$, км/с	$v_{сoud}$, м/с	v_b , км/с	t_m , мкс	$t_{пр}$, мкс	η , %
12	263	16,1	$6,0 \cdot 10^7$	4,91	243	2,32	59,875	9,5	5,50
20	275	16,9	$1,3 \cdot 10^8$	4,91	255	2,44	59,875	9,0	8,83

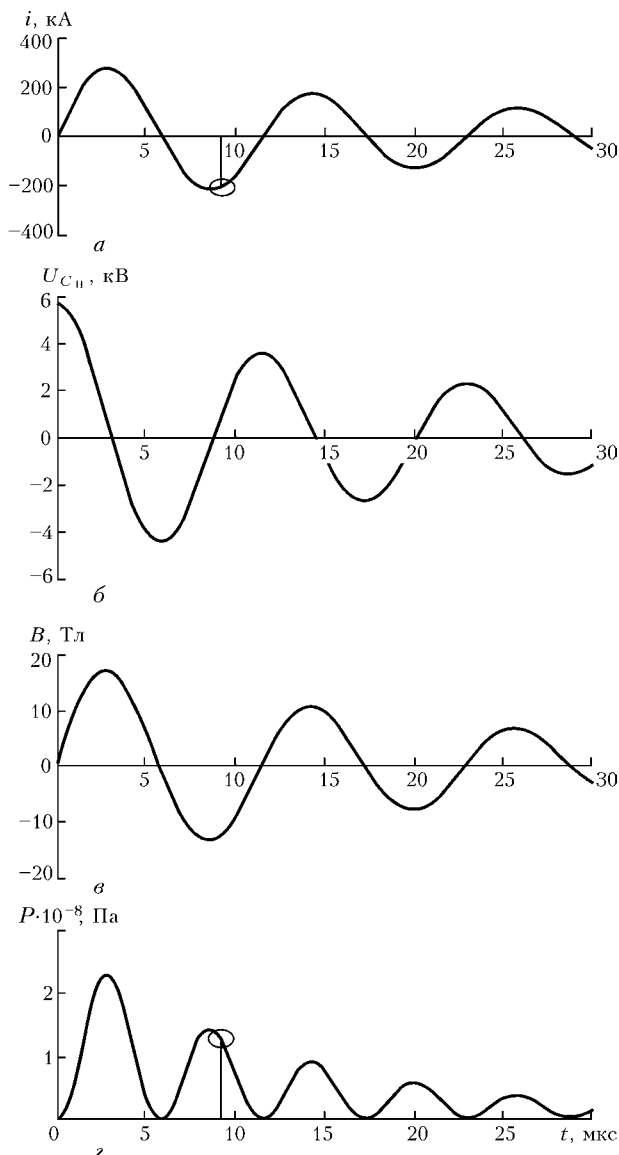


Рис. 3. Расчетные мгновенные значения параметров МИС: *a* — разрядный ток $i(t)$; *б* — напряжение на батарее конденсаторов $U_{C_n}(t)$; *в* — магнитная индукция в рабочем зазоре $B(t)$; *г* — магнитное давление $P(t)$; кружками отмечен момент соударения труб и окончания сварки

буемых диапазонов скорости соударения свариваемых деталей, приведенных в табл. 1 [1].

С помощью указанных расчетов определяли скорость волны соударения, причем энергетические режимы рассчитывали таким образом, чтобы при нор-

мальном прохождении процесса МИС она была меньше скорости звука в жидкости, т. е. должно выполняться неравенство $v_b < v_{зв}$. Диапазон этих скоростей также приведен в табл. 1 [1].

Поскольку величины C , L , R постоянные, то для того, чтобы соблюдать диапазоны границ приведенных выше условий, необходимо подбирать значения U_{C_n} .

Для конечной оценки вычисляли скорости соударения деталей $v_{сoud}$ и движения волны соударения v_b — критериальные параметры, рекомендуемые значения которых необходимо обеспечить для получения качественного сварного соединения [1]. Кроме того, подсчитывали среднее время пролета метаемой детали $t_{пр}$ и проникновения магнитного поля сквозь метаемую деталь t_m таким образом, чтобы выполнялось неравенство $t_m > t_{пр}$. Если для данного соединения обеспечивается получение этих критериальных параметров, то можно гарантировать стабильное воспроизведение процесса сварки.

Расчеты проводили для алюминиевых труб со следующими геометрическими параметрами: толщина метаемой трубы — 1,35 мм; начальный средний зазор между внутренней трубой и метаемой — 1,2 мм; начальный зазор между индуктором и метаемой трубой — 1,5 мм.

Значения основных расчетных параметров для двух вариантов сварки труб с диаметрами метаемых труб 12 и 20 мм приведены в табл. 2. Во всех случаях принимали $\alpha = 6^\circ$, а условный КПД рассчитывали по формулам (3), (4).

На рис. 3 приведены расчетные мгновенные значения параметров режима МИС в случае метаемой трубы диаметром 20 мм. Кривые на рис. 3 по характеру изменения параметров аналогичны полученным для метаемой трубы диаметром 12 мм.

Анализируя результаты расчетов, приведенные в табл. 2, следует обратить внимание на следующие обстоятельства: при МИС трубы диаметром 12 мм время пролета составляет $t_{пр} = 9,5$ мкс (1,75 полупериода тока), а диаметром 20 мм — $t_{пр} = 9,0$ мкс (1,5 полупериода тока), причем время проникновения магнитного поля сквозь метаемую деталь одинаково для обоих случаев и равно 60 мкс; при сварке крупной детали диаметром трубы 20 мм условный КПД больше ($\eta = 8,83\%$), чем при сварке детали, имеющей диаметр трубы 12 мм ($\eta = 5,50\%$).

В случае сварки труб большого диаметра, чтобы скорость соударения метаемых деталей и скорость



волны находились в допустимом диапазоне, напряжение зарядки батареи конденсаторов должно быть выше, чем при сварке труб меньшего диаметра. При этом увеличиваются индуктивность и активное сопротивление разрядного контура сварочной машины, что приводит к уменьшению частоты колебательного разряда батареи конденсаторов.

Таким образом, предложенная методика расчета позволяет с достаточной для практики точностью рассчитывать параметры МИС и выбирать оптимальные режимы сварки.

A method is proposed to calculate the modes of magnetic-pulse welding, which combines the analytical method of calculation and numerical methods, using a PC. Application of this method allows calculation of the parameters of magnetic-pulse welding and selecting the optimum welding modes with an accuracy sufficient for practical purposes.

1. Дудин Д. А. Магнитно-импульсная сварка металлов. — М.: Металлургия, 1979. — 128 с.
2. Пентегов И. В., Стежковский Е. П., Шейковский Д. А. Параметрическая стабилизация режимов конденсаторной сварки сопротивлением // Автомат. сварка. — 1971. — № 10. — С. 13–15.
3. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. — М.: Машиностроение, 1969. — 440 с.
4. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. — Л.: Энергия, 1970. — 432 с.
5. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. — М.: Физматгиз, 1962. — 248 с.

Поступила в редакцию 17.02.2004,
в окончательном варианте 19.02.2004

Разработано в ИЭС

ЛАБОРАТОРИЯ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
(аттестат аккредитации в системе УкрСЕПРО № UA 6.001.T.305 от 08.05.2002)



Назначение:

- проводит сертификационные испытания в соответствии с требованиями аккредитации в системе УкрСЕПРО;
- ведет самостоятельные разработки и оказывает услуги при выполнении научно-исследовательских работ заказчика;
- проводит определение малоциклового усталости образцов в мягком и жестком режимах при разных значениях асимметрии цикла;
- проводит оценку многоциклового усталости при растяжении, сжатии и изгибе;
- определяет механические свойства материалов и сварных соединений;
- выполняет исследования механики разрушения и трещиностойкости материалов;
- проводит испытания по оценке ударной вязкости KCU и KCV на стандартных образцах;
- выполняет высокочастотную механическую проковку зоны сварного соединения элементов металлоконструкций с целью повышения их сопротивления усталости.

Оснащение:

- гидравлическая машина ЦДМ-10пу;
- универсальные гидравлические машины УРС 20/6000, УРС 200/20, "Шенк";
- универсальные электрогидравлические машины УЭ-10, УЕ-50, МП-800;
- универсальная механическая машина УМЕ-10;
- испытательная электромеханическая машина 2054 Р-5;
- маятниковый копер 2130 КМ-0,3;
- испытательная машина МР-500.

Имеет широкий каталог стандартных образцов.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
ИЭС им. Е. О. Патона. Тел.: (38044) 227 60 05;
факс: (38044) 261 04 86; e-mail: knyshj@paton.kiev.ua