

Опубликовано: Тяжелое машиностроение. - 2008. - №6. - С. 18-20.

УДК 621.791.754

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ - ДУГА» ДЛЯ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

О.Б. Гецкин, инж., С.И. Полосков, д-р техн. наук (НПП «Технотрон»)

В.А. Ерофеев, канд. техн. наук (ТулГУ)

О.П. Витько, инж. (ИСК «Росатомстрой»)

В последние годы для реализации процессов MIG/MAG сварки широко применяют сварочные источники повышенного быстродействия с возможностью импульсного воздействия на дугу и сварочную ванну [1]. Подобные источники обеспечивают на качественно ином уровне тепломассоперенос каплей электродного металла, так как имеют информационные каналы для корректировки отклонений процесса сварки. Однако для гарантированного переноса каждой капли электродного металла в сварочную ванну [2,3], и тем самым снижения разбрызгивания электродного металла, необходимо знание характеристик основных физических процессов, определяющих тепломассоперенос.

Цель работы – создание динамической нелинейной физико-математической модели, решение системы уравнений которой позволило бы воспроизводить микроцикл сварки от начального возбуждения дуги и образования капли электродного металла до переноса каплей через дугу.

Физико-математическая модель. В предлагаемой модели рассматривается электрическая цепь питания сварочной дуги источником с постоянным заданным напряжением холостого хода U_{xx} (рис. 1).

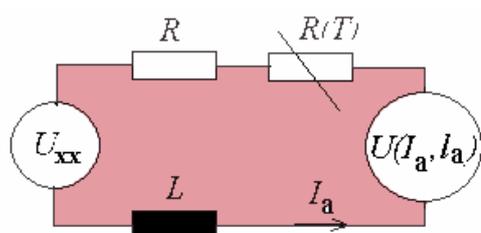


Рис. 1. Электрическая схема питания дуги при сварке плавящимся электродом

В этом случае могут быть учтены индуктивность L , активное сопротивление R источника и цепи питания дуги, а также сопротивление вылета $R(T)$, определяющее прогрев вылета электрода. Дуга в модели

характеризуется вольтамперной характеристикой (ВАХ) и зависимостью напряжения дуги U_a от её длины l_a , в допущении о безинерционности этой зависимости от тока I_a дуги. Угол наклона ВАХ определяют по активному сопротивлению источника и цепи питания дуги.

Зависимость $U_a(l_a, I_a)$ от длины дуги l_a аппроксимирована линейной зависимостью, а от тока I_a - параболической функцией:

$$U_a(l_a, I_a) = U_0 + l_a \cdot \text{grad}U + R_a \left(1 - \frac{I_0}{I_a} \right)^2,$$

где U_0 - сумма анодного и катодного падения напряжений, $\text{grad} U$ - градиент потенциала в столбе дуги; R_a - динамическое сопротивление столба дуги; I_0 - значение тока, при котором напряжение дуги минимально.

Сопротивление вылета электрода определяли по распределению температуры в вылете:

$$R(T) = \frac{1}{\pi r_f^2} \int_0^{l_e} \rho_e(T_f(z)) dz,$$

где $\rho_e(T_f)$ - зависимость удельного сопротивления материала электрода от его температуры T_f , l_e - длина вылета электродной проволоки от торца токоподводящего мундштука до дуги; r_f - радиус электродной проволоки; z - ордината осевого перемещения электродной проволоки и капли металла в ванну.

Температуру металла в вылете определяли с учётом изменения тока дуги времени:

$$T_f = \frac{1}{c\rho(\pi r_f^2)^2} \int_{t-\frac{l_e}{v_f}}^t \rho_e(T_f) I_a^2(\tau) d\tau,$$

где v_f - скорость подачи электрода; $\tau = \frac{z}{v_f}$ - время перемещения электродного металла на расстояние z от торца от токоподводящего мундштука; ρ - плотность металла электрода; c - удельная теплоёмкость; t - время переноса одной капли через дуговой промежуток в микроцикле сварки.

Электрические процессы в цепи питания дуги описаны уравнением, которое связывает ток I_a и напряжение дуги U_a с параметрами источника:

$$I_a = \min \left(I_{\max}, \frac{1}{L} \int_0^t (U_0 - U_a(I_a, l_a) - I_a(R + R(T))) dt \right),$$

Длина l_a определялась по минимальному расстоянию между поверхностью сварочной ванны и каплей на электроде при максимальных значениях тока дуги I_{\max} , соизмеримому с током короткого замыкания. Так как изменение l_a в микроцикле сварки определяется скоростью подачи электрода v_f и изменяющимся диаметром D капли, рис. 2, то правомочно соотношение:

$$\frac{dl_a}{dt} = -\frac{dD}{dt} - v_f$$

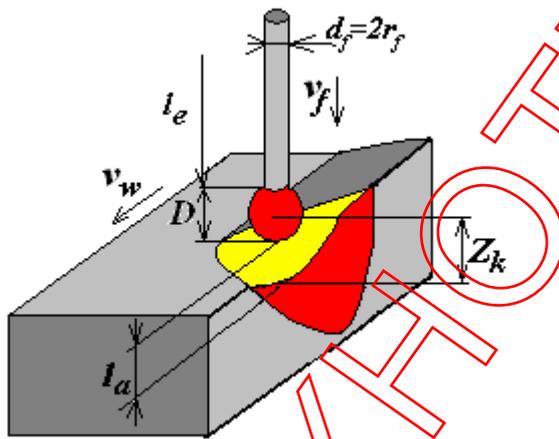


Рис. 2. Геометрические параметры дугового промежутка

Размер капли определяется скоростью v_e плавления электродного металла, которая зависит от теплопередачи от дуги к капле и поэтому может отличаться от скорости подачи v_f проволоки, определяя изменения l_a . Тепловая мощность дуги увеличивает среднюю температуру каплю со скоростью, равной

$$\frac{dT_K}{dt} = \frac{U_e I_a - \lambda \frac{\pi d_f^2}{D} (T_K - T_L)}{c \rho \frac{\pi D^3}{6}},$$

где U_e - падение напряжения в анодной области дуги; λ - теплопроводность металла электрода; T_L - температура плавления; T_K -

текущая средняя температура капли; D - текущий диаметр капли; d_f - диаметр электродной проволоки, определяющий площадь контакта «капля - проволока».

Одновременно в контактной зоне «капля - проволока» возникает тепловой поток P_f , равный:

$$P_f = \pi d_f^2 \frac{2\lambda}{D} (T_K - T_L),$$

Этот тепловой поток вызывает дополнительное плавление электродной проволоки с нарастанием текущего объёма капли V_K со скоростью

$$\frac{dV_K}{dt} = \frac{P_f}{c\rho(T_K - T_L) + H_L},$$

где H_L – удельная теплота плавления.

В этом случае текущий диаметр капли определяет её объём:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V_K}.$$

Анализ кинограмм [4] показал, что модель должна учитывать действие на каплю не только электромагнитной силы, но и сил поверхностного натяжения, как на поверхности капли, так и в зоне «капля-ванна» [5]. В момент соприкосновения поверхностей ванны и капли начинается процесс их слияния с образованием общей поверхности под действием сил поверхностного натяжения, инерции и гравитации. Изменение расположения центра масс капли Z_K (рис. 2) относительно поверхности ванны, вызванное изменением её формы, определяется уравнением:

$$\frac{d_f^2 Z_K}{dt^2} = \frac{F_\sigma + F_I + m_K g}{m_K},$$

где $m_K = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho$ - масса капли, $F_\sigma = (\pi D - 12Z_K) \sigma$ - сила поверхностного

натяжения, $F_I \approx k I_a^2 \left(\frac{r_f}{r_K} - 1 \right)$ - электромагнитная сила, зависящая от радиуса

контакта капли с ванной $r_K \approx 6\sqrt{2}Z_K$ при их слиянии.

На двух из пяти временных отрезков микроцикла сварки t_I (возбуждение

дуги) и t_2 (начало плавления электродной проволоки) форма капли изменяется от полусферы до шарового сегмента с срединным расположением центра масс. Затем, по мере увеличения размеров капли и осевой деформации, центр масс капли может перемещаться в следующие характерные точки:

$$Z_K(t_3) = \frac{r_f}{6\sqrt{2}} \quad - \quad \text{момент изменения направления действия}$$

электромагнитной силы и начало деформирования капли;

$$Z_K(t_4) = \frac{D}{12} \quad - \quad \text{начало формирования шейки между каплей и электродом;}$$

$$Z_K(t_5) = \frac{D + 2r_f}{12} \quad - \quad \text{полное отделение капли от электрода и начало ее}$$

перемещения через дуговой промежуток, либо переход ее в ванну и повторное возбуждение дуги при сварке с короткими замыканиями (КЗ).

Отрыв капли без короткого замыкания дугового промежутка происходит, когда сила поверхностного натяжения F_σ , удерживающая каплю на электроде, станет меньше электромагнитной силы F_I и силы тяжести F_G :

$$\pi D \sigma < k I_a^2 \left(\frac{d_f}{D} - 1 \right) + \frac{1}{6} \pi D^3 g \cdot \cos \alpha,$$

где g - ускорение свободного падения; α - угол наклона электрода относительно вектора силы тяжести; σ - поверхностное натяжение на границе фаз.

Решение этого неравенства с учетом состава газовой среды [6] позволяет определить значение диаметра капли, при котором будет разрушена перемычка (шейка капли) в зоне «капля-проволока» [7], а также реактивную отдачу испаряемого при этом металла [8]. Воздействие испаряемого металла учитывается в случае, когда текущая температура поверхности капли значительно превышает температуру плавления электродного металла:

$$T_{\max} \approx 2T_K - T_L$$

Длительность возможного КЗ определяется решением уравнения,

описывающего изменение координаты $Z_K(t)$ положения центра масс, пока центр масс $Z_K(t_5)$ не переместится на поверхность ванны. При этом раздельное действие теплового потока от дуги и тепломассоперенос каплей обеспечивает форму и размеры сварочной ванны.

Для численного решения уравнений рассмотренной модели разработана специальная компьютерная программа, виртуально воспроизводящая основные физические явления при MIG/MAG сварке.

Численное решение. Компьютерное моделирование позволяет наглядно воспроизводить возбуждение дуги, различные типы переноса электродного металла: сварку с крупно и мелкокапельным переносом, перенос электродного металла при сварке с КЗ, режим замыкания шва и заварки кратера при завершении процесса сварки.

Моделирование процесса сварки тонкой проволокой, рис. 3, показало, что при малой скорости подачи проволоки процесс очень неустойчив, что выражается в возникновении хаотических обрывов и КЗ дуги. При этом при пониженном напряжении холостого хода U_{xx} источника затруднено повторное возбуждение дуги.

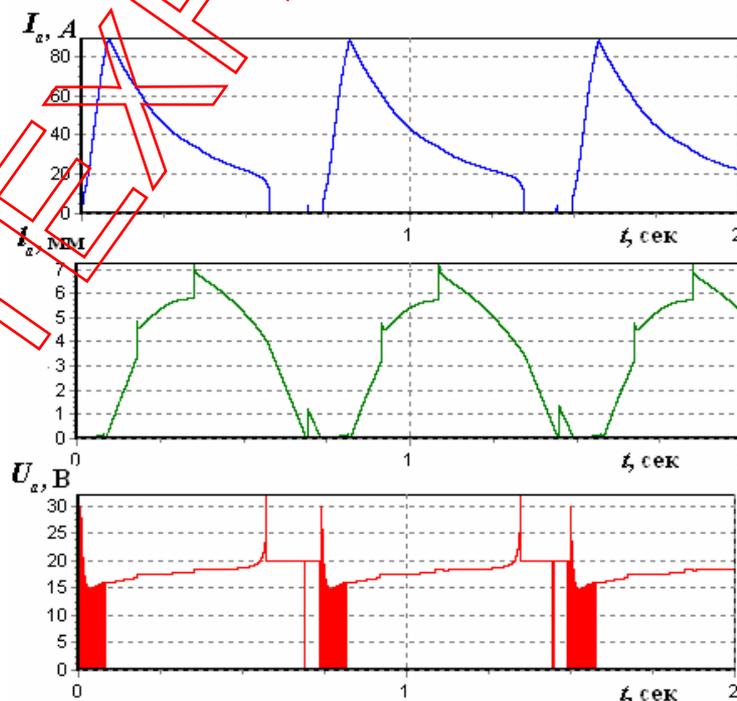


Рис. 3. Характерные возмущения неустойчивого процесса сварки в CO_2
($d_f = 0,8$ мм, $v_f = 30$ мм/с, $U_{xx} = 18$ В, $R = 0,06$ Ом, $L = 10$ мГн)

Для подобных случаев сварки решение системы уравнений модели позволяет воспроизвести характерные всплески напряжения дуги в момент её обрыва, связанные с возникновением ЭДС самоиндукции при разрыве сварочной цепи. Компьютерное моделирование наглядно показывает условия изменения характера переноса капель через дуговой промежуток в зависимости от параметров и возможных возмущений процесса.

В частности установлено, что увеличение диаметра и скорости подачи проволоки и сопротивления сварочной цепи позволяет получить устойчивый режим горения длинной дуги с крупнокапельным переносом, рис. 4.

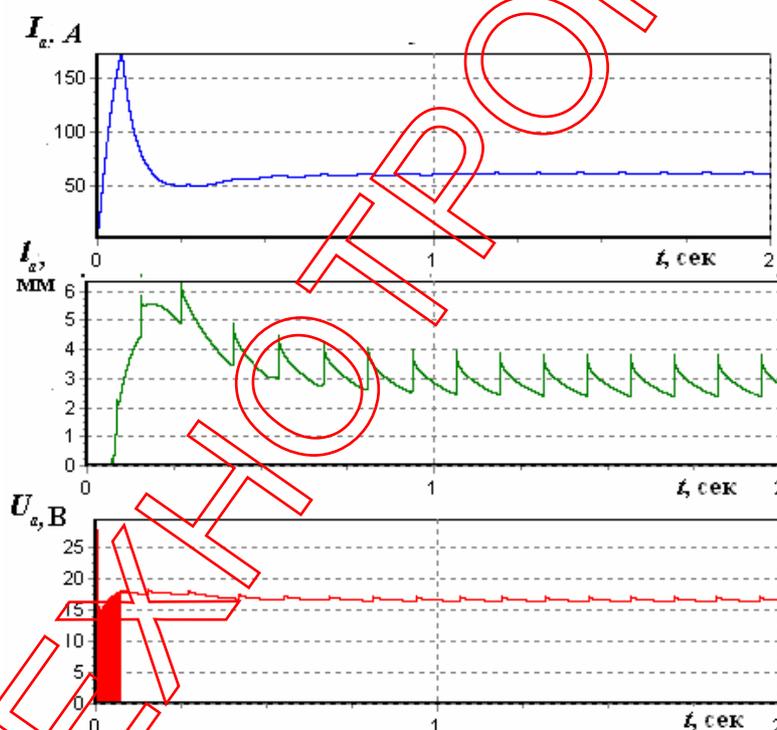


Рис. 4. Устойчивый процесс сварки длинной дугой в CO_2
($d_f = 1,2$ мм, $v_f = 90$ мм/с, $U_{xx} = 30$ В, $R = 0,06$ Ом, $L = 2$ мГн)

Однако изменение индуктивности L , а также активного сопротивления R источника и цепи питания дуги может приводить к повышенному разбрызгиванию электродного металла.

Компьютерное моделирование позволило так же уточнить механизм перехода процесса сварки длинной дугой в процесс сварки короткой дугой с систематическими КЗ дугового промежутка, рис. 5. Такой переход возможен

только при относительно низком U_{xx} источника. Установлено, что влияние индуктивности L , а также активного сопротивления R источника и цепи питания дуги в этом случае минимально.

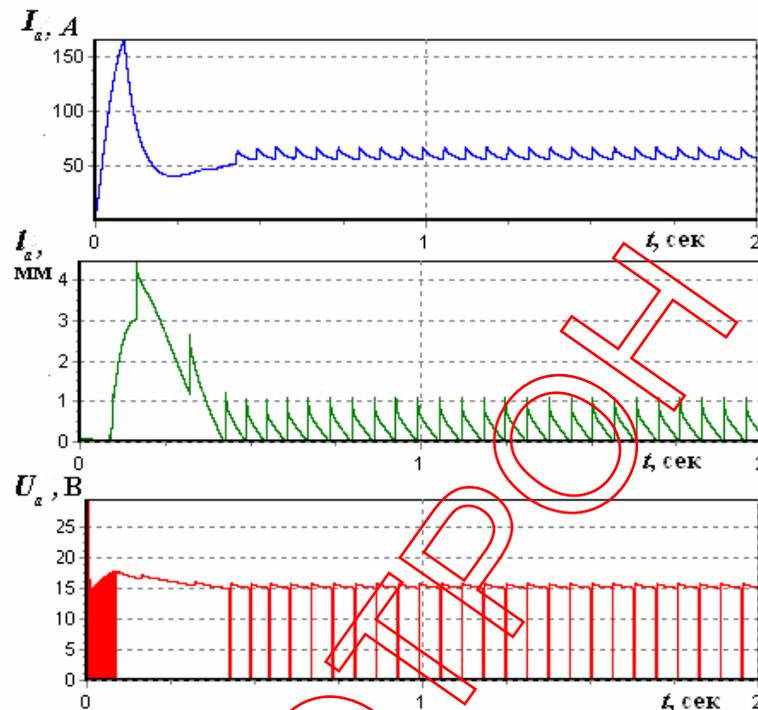


Рис. 5. Процесс сварки в CO_2 с систематическими короткими замыканиями
 ($d_f = 1.2$ мм, $v_f = 90$ мм/с ($U_{xx} = 27$ В, $R = 0,06$ Ом, $L = 2$ мГн))

Сравнение с опытными данными. Достоверность описанной модели проверена по данным экспериментальных исследований тепломассопереноса капель электродного металла при MIG/MAG сварке, приведенным в работах [9,10]. В таблице приведены опытные данные, сопоставленные с результатами компьютерной имитации.

Результаты опытов и имитации процесса дуговой сварки в CO_2

Таблица

Параметры процесса сварки				Результаты опытов			Результаты имитации		
d_f , мм	v_f , мм/с	U_{xx} , В	l_e , мм	I_a , А	U_a , В	t , мс	I_a , А	U_a , В	t , мс
0.8	40	32	10	60	26	14	51	24	15
0.8	93	32	10	120	24	9.8	107	22	9.3
1.0	86	48	12	115	22	11	111	24	9.8
1.2	92	48	12	135	21	10	172	22	9.5
1.6	78	48	16	280	20	11	260	21	10
1.6	87	48	14	280	22	13	290	21	12

При проверке варьировали технологические параметры: диаметр d_f электродной проволоки, скорость v_f ее подачи, U_{xx} источника питания, длину вылета l_e электрода. При компьютерной имитации фиксировали ток I_a , напряжение U_a дуги и период t перемещения капель через дуговой промежуток.

Полученные результаты свидетельствуют, что расчётные значения тока и напряжения дуги в период следования капель удовлетворительно совпадают с опытными данными.

На основе представленной физико-математической модели определены технологические требования на конструирование различных видов оборудования для ручной, механизированной и автоматической MIG/MAG сварки [11,12].

Данная модель является хорошей основой для обоснования технологических требований на конструирование различных типов сварочного оборудования, а также разработки обобщенной физико-математической модели прогнозирования качества сварных соединений, полученных при реализации таких высокотехнологичных процессов, как автоматическая орбитальная сварка трубопроводов больших диаметров для нефтегазовой промышленности или толстостенных трубопроводов, применяемых на тепловых и атомных станциях.

Выводы

Разработана физико-математическая модель системы «источник питания - дуга» для дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах, учитывающая характер тепломассопереноса капель электродного металла.

Для реализации численного решения уравнений рассмотренной модели, разработана специальная компьютерная программа, которая воспроизводит компьютерную имитацию характерных явлений при дуговой сварке: неустойчивость процесса при возмущениях по скорости подачи электродной проволоки, периодические замыкания дугового промежутка каплей при

низком напряжении сварочной дуги и изменения в характере тепломассопереноса при повышении напряжения источника сварочного тока.

Использование разработанной физико-математической модели системы «источник питания - дуга» при компьютерной имитации процесса MIG/MAG сварки позволяет обоснованно определять технологические требования на конструирование различных типов оборудования для ручной, механизированной и автоматической сварки.

Список литературы

1. *Коротынский А.Е.* Состояние, тенденции и перспективы развития высокочастотных сварочных преобразователей (обзор) // Автоматическая сварка. - 2002. - № 7. - С. 50-63.
2. *Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding* / F. Wang, W.K. Hou, S.J. Hu, et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2003, Vol.36. - P. 1-19.
3. *Mathematical modeling of metal active gas arc welding* / T. Yamamoto, T. Ohji, F. Miyasaka, Y. Tsuji // Science and Technology of Welding & Joining. - 2002, Vol.7. - №4. - P. 260-264.
4. *Управление переносом капли при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка* / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. - 2001. - № 6. - С. 6-9.
5. *Полосков С.И.* Технологические основы автоматической орбитальной сварки трубопроводов атомных станций. Автореф. дис. ... д-р. техн. наук. - М.: НИКИМТ, 2006. - 32 с.
6. *Влияние особенностей газовой защиты сварочной ванны на некоторые технологические параметры процесса сварки плавящимся электродом* / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварка и смежные технологии. - М.: МЭИ (ТУ), 2000. - С. 26-28.
7. *Fan H.G., Kovacevic R.* Front line of modeling heat and mass transfer in arc welding processes // Journal of the Japan welding society. - 2007, Vol.76. - № 2. - P. 6-13.
8. *Murugan N., Gunaraj V.* Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes // Journal of Materials Processing Technology. - 2005, Vol.168. - №3. - P. 478-487.
9. *Analysis of active control of metal transfer in modified pulsed GMAW* / M.A. Chen, C.S. Wu, S.K. Li, Y.M. Zhang // Science and Technology of Welding & Joining. - 2007, Vol.12. - №1. - P. 10-14.
10. *Лебедев А.В.* Исследование управляемого переноса электродного

металла при сварке в углекислом газе // Автоматическая сварка. - 1991. - № 3. - С. 33-37.

11. Гецкин О.Б., Яров В.М. Опыт создания высокоэффективного сварочного оборудования в НПП «ТехноТрон» // Сварочное производство. - 2000. - №5. - С. 28-32.

12. Гецкин О.Б., Гецкин Б.Л., Полосков С.И. Практическая реализация управляемого тепломассопереноса капель при автоматической орбитальной сварке плавящимся электродом // Состояние и перспективы развития электротехнологий: Тематический сборник по материалам XIII Бенардосовских чтений. - Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2006. - С. 140-145.

АННОТАЦИЯ

Физико-математическая модель системы «источник питания - дуга» для сварки плавящимся электродом в защитных газах / О.Б. Гецкин, С. И. Полосков, В.А. Ерофеев, О.П. Витько.

Разработана физико-математическая модель системы "источник питания - дуга" при MIG/MAG сварке в виде системы дифференциальных уравнений, которая учитывает условия переноса электродного металла через дуговой промежуток и взаимодействия дуги с электрическими параметрами источника питания. Компьютерная программа, реализующая численное решение уравнений модели, воспроизводит наиболее характерные явления процессов MIG/MAG сварки. Программа позволяет обоснованно определять технологические требования при конструировании оборудования для ручной, механизированной и автоматической сварки.

ABSTRACT

Physical and Mathematical Model of the System "Power Source - Arc" for MIG/MAG Welding / O.B. Getskin, S.I. Poloskov, V.A. Erofeev, O.P. Vitko

A physical and mathematical model of the system "Power Source - Arc" for MIG/MAG welding has been developed. The model is based on a set of differential equations and takes into account as well the conditions of the droplets transfer through the arc gap as the interaction of the arc parameters with those of the power source. The model equations are numerically solved by a computer program that allows for modeling the most important phenomena of MIG/MAG welding. The program helps engineers specify technological requirements during the designing stage for the manual, mechanized and automatic welding processes.