



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглублиение в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах

Макаров А. Н., доктор техн. наук,
Кузнецов А. В., Рыбакова В. В., Галичева М. К., инженеры
Тверской государственной технической университет

Приведены результаты исследования влияния параметров электрической дуги и формы электрода на электромагнитное заглублиение дуги в дуговых сталеплавильных печах. Показано, что при электромагнитном выдувании дуги из-под электрода градиент напряжения в столбе дуги уменьшается, а ее длина увеличивается. Доказано, что максимальное электромагнитное заглублиение дуги происходит при определенном соотношении напряжения и тока дуги при горизонтальной поверхности торца электрода.

Ключевые слова: электросталь, электрическая дуга, электромагнитная сила, теплообмен, излучение.

Основные плавильные агрегаты на металлургических предприятиях — 100- и 150-тонные дуговые сталеплавильные печи (ДСП) трехфазного тока с трансформаторами мощностью 90 – 120 МВ · А. Источником энергии в ДСП являются три электрические дуги, каждая из которых имеет следующие параметры: ток $I_d = 40 \div 70$ кА, напряжение $U_d = 100 \div 400$ В, мощность $P_d = 6 \div 30$ МВт, длина $l_d = 100 \div 500$ мм. Шихтой служит металлолом, легирующие элементы — ферросплавы.

Расплавление начинают с прорезки колодцев (диаметром около 700 мм) в шихте электродами (диаметром 600 мм) в течение 6 – 8 мин. При этом градиент напряжения в столбе дуги $b = 8 \div 10$ В/мм, длина дуги на высшей ступени напряжения $l_d = 40 \div 50$ мм при анодно-катодном падении напряжения $a = 20$ В. При достижении электродами уровня жидкого металла, покрытого на поде слоем шлака, температура дуги T_d уменьшается (с 6300 до 4900 К), градиент напряжения в ее столбе снижается (с 8 – 10 до 1 В/мм), а длина дуги увеличивается (с 40 – 50 до 350 – 400 мм). Приведенные значения параметров дуги получены из следующих выражений [1, 2]:

$$T_d = 800U_i; \quad (1)$$

$$U_d = a + bl_d. \quad (2)$$

Дальнейшее расплавление шихты осуществляется длинными дугами, направленными на жидкий металл, покрытый слоем шлака.

После расплавления 30 – 40 % шихты технологи стремятся погрузить дуги в металл и шлак. Это делается для того, чтобы, уменьшив их излучение на стены и свод печи (согласно результатам многочисленных исследований на печах вместимостью от 20 до 200 т теплообмен излучением составляет 90 – 95 % суммарного теплообмена дуг [1, 2]), увеличить КПД дуг. О погружении дуг в жидкометаллическую ванну под действием электромагнитной силы, создаваемой током дуги, известно с середины XX столетия [1, 2]. Однако в последние 10 лет появляются статьи, в которых подвергается сомнению образование лунки в ванне металла под действием электромагнитной силы, создаваемой током дуги [3]. Это объясняют увеличением напряжения, мощности, длины дуги, а также изменением ее формы и размеров.

Сложность верификации воздействия электромагнитной силы дуги на ванну с образованием в ней лунки обусловлена невозможностью визуального наблюдения за последней. При фотографировании и киносъемке дуги лунка, находящаяся ниже горизонтальной линии металла и шлака, не попадает в зону видимости объектива. Проанализируем проведенные на действующих ДСП экспериментальные исследования заглублиения дуг в жидкий металл и шлак, описанные в разных литературных источниках.

Поведение дуги в течение полупериода протекания тока было подробно описано еще

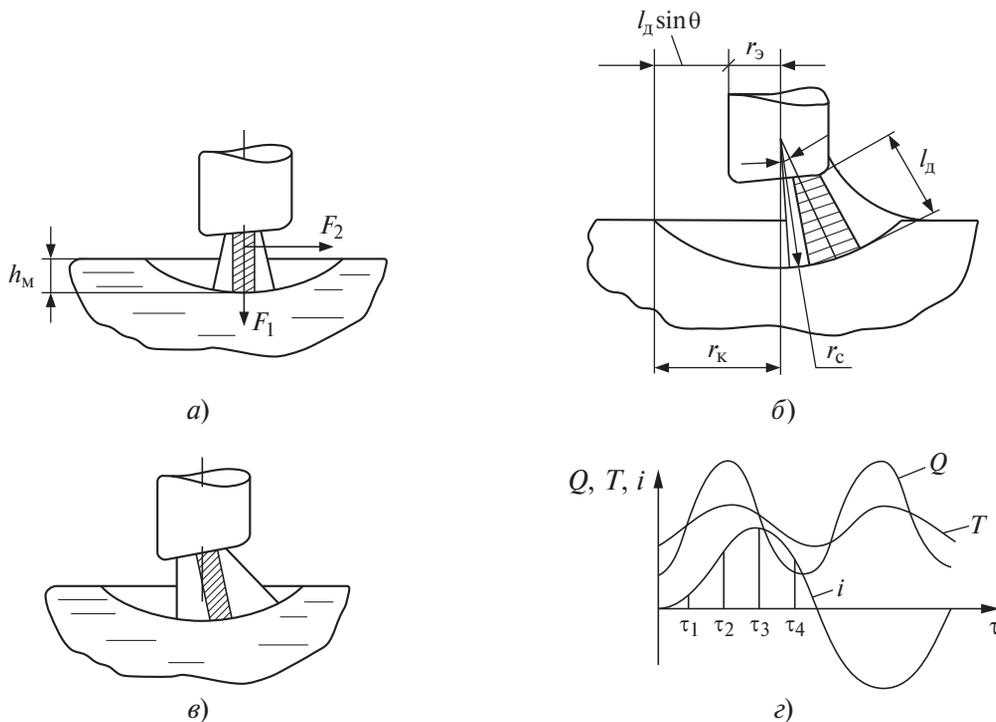


Рис. 1. Изменение формы дуги в течение полупериода протекания тока:

a – в — форма дуги в моменты времени соответственно $\tau_1, \tau_2, \tau_3 - \tau_4$; *г* — кривые изменения мгновенного значения тока i , температуры T и теплового потока Q дуги

в 1954 г. Ю. Е. Ефреймовичем по результатам киносъемки [1] (в дальнейшем они подтверждены и другими исследователями [1, 2, 4, 5]). Изменение формы дуги для окончания периода расплавления шихты показано на рис. 1. В момент, когда ток равен нулю, часть пространства под электродом заполнена светящимся газом. При появлении тока ($\tau = \tau_1$) под воздействием электромагнитной силы F_1 (вызвана эффектом сжатия, возникающим вследствие взаимодействия тока дуги с собственным электромагнитным полем), направленной по оси проводника, дуга загорается на оси электрода в углублении в металле высотой h_M (см. рис. 1, *a*). Электромагнитное поле, создаваемое током, протекающим в жидкой ванне, воздействует на столб дуги силой F_2 , вызывая выдувание металла. По мере увеличения тока F_2 возрастает быстрее, чем F_1 , и при условии $F_2 > F_1$ под ее воздействием дуга перемещается (со скоростью несколько десятков метров в секунду) к краю электрода, при этом диаметр столба дуги непрерывно увеличивается. Остановившись одним опорным пятном на кромке электрода, дуга продолжает перемещаться по поверхности металла до тех пор, пока ее длина не достигнет значения, определяемого из выражения (2). В моменты времени τ_2 и

τ_4 дуга принимает положения, соответствующие показанным на рис. 1, *б, в*. Описанные движение и отклонения столба дуги приводят к выдуванию ее в сторону футеровки.

При уменьшении тока появляется возможность выполнения условия $F_1 > F_2$, при котором сила F_1 возвращает столб в первоначальное положение, совпадающее с осью электрода. Рис. 1 соответствует полупериоду тока, когда графитовый электрод является катодом и дуга от него вытянута к аноду. При этом катодное пятно перемещается со скоростью 10 – 100 м/с. В полупериод, когда графитовый электрод является анодом, проводящий газовый канал вследствие своей подвижности размыт [5].

Под воздействием силы F_1 в жидком металле образуется сегмент (мениск, лунка) радиусом r_c , высотой h_M с радиусом круга на поверхности металла r_k . Среднее значение угла выдувания дуги от оси электрода — θ , радиус электрода — $r_э$. Из рис. 1 видно, что в течение полупериода протекания тока дуги после ее зажигания увеличиваются диаметр и длина дуги, уменьшается градиент напряжения в ее столбе. При работе печи на переменном токе электрические, геометрические, тепловые параметры дуги постоянно изменяются в соответствии с изменением значения и направления тока. При вычислениях элек-

трических, геометрических и тепловых параметров дуги предложено исходить из их средних (эффективных) значений [4] аналогично тому, как в цепях переменного тока электрические параметры цепей оценивают по среднему эффективному значению, соответствующему тепловому действию постоянного тока.

Расчет средних значений геометрических и тепловых параметров дуги, а также размеров заглибления дуги в ванну приведен в [6], там же подробно рассмотрена физическая природа возникновения вертикальной F_1 и горизонтальной F_2 электромагнитных сил. Их можно определить из следующих выражений [7]:

$$F_1 = \frac{\mu_0 I_d^2}{4\pi}; \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{\mu I_d^2 J_d}{4\pi h}, \quad (4)$$

где μ_0 и μ — магнитная проницаемость соответственно вакуума и плазмы дуги; $h = 0,032 \div 0,036$ м [2].

Как видно из выражения (3), F_1 пропорциональна квадрату тока дуги, т. е. чем больше ток, тем значительнее F_1 и тем больше заглибление дуги в ванну металла. Что касается F_2 , из выражения (4) следует, что она пропорциональна квадрату тока и длине дуги, т. е. чем значительнее ток и длина дуги, тем больше F_2 и электромагнитное выдувание дуги из-под электрода по поверхности ванны металла в сторону стены. Аналогичные явления (заглибление и выдувание дуги) в ДСП наблюдали в 400-тонных печах при токах 70–80 кА американские исследователи В. Швабе и С. Робинсон [8, 9].

Первые экспериментальные исследования заглибления дуги в жидкометаллическую ванну выполнил в 1972–1975 гг. на действующих 20-, 50-, 100- и 200-тонных печах Р. И. Спелицин [5]. Ток дуги в экспериментах изменяли от 25 до 55 кА, напряжение на дуге — от 70 до 219 В. Управление электродами осуществляли вручную. Подняв все три электрода до обрыва дуги, первый электрод затем оставляли неподвижным, второй опускали до возникновения надежного КЗ, после чего опускали третий электрод. После образования дуги между третьим электродом и ванной электрод продолжали опускать (при этом ток дуги увеличивался, в то время как напряжение и длина уменьшались) до возникновения КЗ. В экспериментах электромагнитное давление F_1 дуги на жидкий металл было столь значительным, что глубина

образовавшейся лунки превышала длину дуги, а нижний торец электрода находился ниже уровня ванны металла. Затем напряжение отключали, третий электрод поднимали, измеряя расстояние (высоту предельного заглибления дуги в ванну металла), на которое он переместился до появления над уровнем ванны металла. По результатам измерений определяли также градиент напряжения в столбе дуги вдоль вертикальной оси.

В результате многочисленных исследований была установлена зависимость высоты заглибления дуги от ее тока и найден усредненный коэффициент заглибления дуги $K_3 = 3$ мм/кА. Например, при токе 20 кА она заглибилась в ванну металла на 60 мм, при токе 60 кА — на 180 мм. Таким образом, Р. И. Спелицин, проводивший многочисленные эксперименты по исследованию заглибления дуги в ванну металла, доказал существование лунки и установил математическую зависимость между током дуги и высотой ее предельного заглибления. Недостаток этих исследований заключался в том, что не было выявлено влияние других сопутствующих горению дуги факторов на ее заглибление.

За длительный период применения ДСП разными специалистами [1–10] были проведены экспериментальные исследования и выполнены расчеты электромагнитного заглибления и выдувания дуги в печах, а также проанализированы полученные значения коэффициента заглибления дуги K_3 , анодно-катодного напряжения a и градиента напряжения в столбе дуги b (см. табл. 1). Как видно из приведенных данных, коэффициент K_3 в условиях эксплуатации изменяется от 0,9 до 3,6 мм/кА и зависит от тока и напряжения дуги.

Ю. Е. Ефроймович, рассматривая дугу, разбивал ее на три зоны: нижнюю — горящую в мениске металла, среднюю — в шлаке, верхнюю — в атмосфере печи [1]. Спустя 10 лет он установил, что по мере снижения напряжения и роста тока дуги увеличиваются диаметр и глубина мениска, образующегося в ванне металла, и количество теплоты, передаваемой металлу. Максимальное заглибление дуги достигается при определенном соотношении тока, напряжения и длины дуги, при котором она горит по оси электрода (см. рис. 1, a) и передает максимальное количество энергии ванне металла. Аналогично описывает поведение дуги и ее заглибление в ванну металла В. Швабе [8, 9].

Р. И. Спелицин, проводя экспериментальные исследования на 20–200-тонных печах,

Таблица 1

| Параметр | Ю. Е. Ефрой-мович [1] | В. Швабе [8, 9] | Р. И. Спели-цин [5] | Л. Е. Николь-ский [1] | А. В. Егоров [2] | А. Н. Мака-ров [4, 6] |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Вместимость ДСП, т | 20 | 400 | 20 – 200 | 20 – 200 | 20 – 200 | 20 – 200 |
| I_d , кА | 15 – 20 | 70 – 90 | 27 – 55 | 20 – 70 | 20 – 70 | 20 – 70 |
| U_d , В | 50 – 90 | 200 – 400 | 70 – 219 | 100 – 230 | 100 – 250 | 100 – 350 |
| K_3 , мм | 0,9 – 1,2 | Дуга горит в углублении | 2,2 – 3,6 | 1,2 – 3,0 | 2,0 – 3,0 | 1,0 – 3,0 |
| b , В/мм, при горении: | | | | | | |
| на шихту | 10 – 12 | 10 | 10 | 10 – 12 | 10 – 12 | 10 |
| на ванну | 0,6 – 1,6 | 0,6 – 1,0 | 0,7 – 1,6 | 1,0 – 1,2 | 0,7 – 1,1 | 0,4 – 1,0 |
| a , В | — | 40 – 50 | 17 – 40 | 17 – 30 | 17 – 40 | 17 – 40 |

в которых при определенных соотношениях тока и напряжения дуга горела по оси электрода, нашел предельное ее заглубление в ванну металла [5] и средний коэффициент предельного заглубления дуги $K_3 = 3$ мм/кА. В дальнейшем это значение K_3 использовали многие исследователи в своих расчетах [1, 2, 4, 5].

Однако проведенные нами в 1997 – 1999 гг. исследования более 300 плавов на 150-тонных печах ОАО ОЭМК показали, что при токах 60 – 65 кА с увеличением напряжения и длины дуги растет электромагнитное выдувание дуги и уменьшается ее заглубление в ванну. Параметры использованного в рассматриваемой ДСП электропечного трансформатора: $S = 90$ МВ · А, 23 ступени изменения вторичного напряжения в диапазоне $U_2 = 795 \div 265$ В с шагом $\Delta U = 24$ В, на высшей ступени $U_{23} = 795$ В, ток дуги $I_d = 35 \div 70$ кА. Продолжительность плавки — 120 ÷ 130 мин, в том числе при токе 95 – 105 мин.

В печь одновременно загружали 60 – 70 т металлошихты и после формирования плавильной зоны — еще 90 – 100 т металлизированных окатышей. По результатам исследований, проведенных на печах ДСП-150, и данным табл. 1 построены графики $K_3 = f(I_d)$ (рис. 2). Значение этого коэффициента зависит от тока, длины, положения дуги и формы поверхности торца электрода и определяется по зависимостям 1 и 2. Зависимость 1 соответствует предельному заглублению дуги при определенном соотношении ее длины и высоты заглубления, а также при условии горения дуги по оси электрода, т. е. она соответствует случаю, когда дуга оказывается под электродом и практически не выдувается

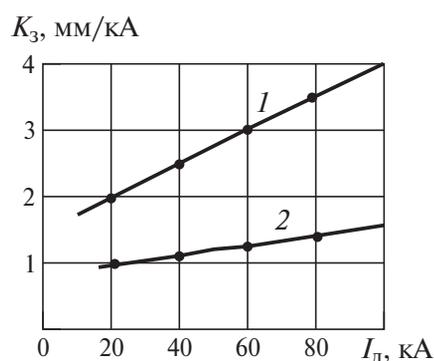


Рис. 2. Зависимость изменения коэффициента заглубления от тока дуги:

1 — $K_{3\max} = f(I_d)$; 2 — $K_{3\min} = f(I_d)$

из-под него [5]. Проведенные исследования показали, что предельное для данного тока заглубление дуги происходит тогда, когда торец электрода, где горит дуга, имеет горизонтальную поверхность, а высота заглубления дуги превышает ее длину. В остальных случаях она выдувается из-под электрода, и коэффициент ее заглубления определяется по зависимости 2.

Результаты измерений и визуального исследования поведения дуги представлены на рис. 3, а параметры трансформатора, дуги и углубления в ванне металла — в табл. 2.

На рис. 3, а показаны формы электрода, дуги, углубления в ванне металла на 45-й минуте работы печи на 20-й ступени. Во время плавки осуществляется продувка ванны кислородом, что вызывает кипение и всплески металла высотой до 300 мм, на поверхности ванны наводится вспененный шлак высотой 200 мм. Дуга интенсивно выдувается из-под электрода. По зависимости 2 на рис. 2 для тока $I_d = 65$ кА находим $K_3 =$

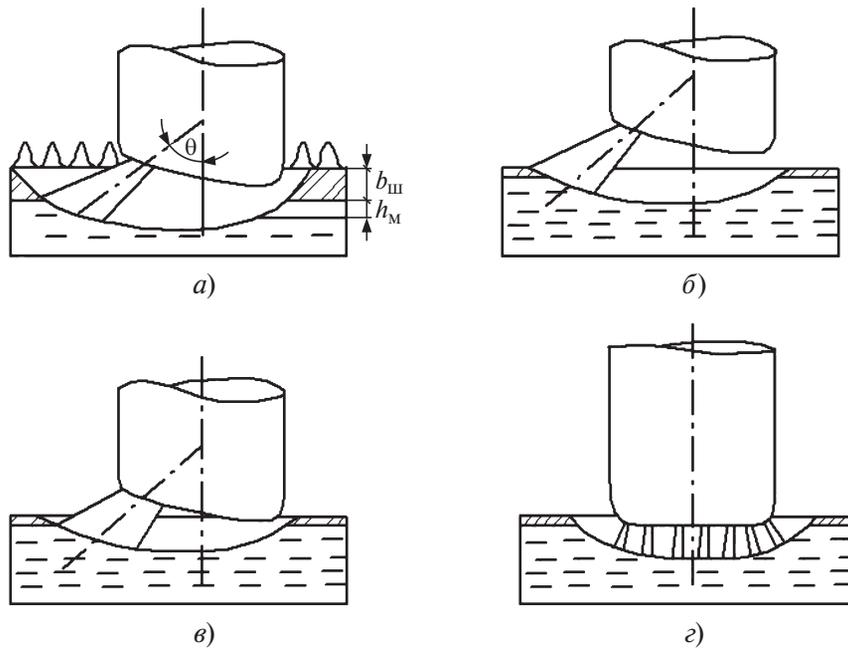


Рис. 3. Форма электрода, дуги и предполагаемая форма углубления в ванне металла при различных электрических режимах и параметрах дуги

Таблица 2

| Параметр | Значение параметра на рис. 3 | | | |
|------------------|------------------------------|-----|-----|-----|
| | а | б | в | г |
| Ступень | 20 | 17 | 10 | 10 |
| U_{ϕ} , В | 417 | 375 | 278 | 278 |
| $U_{д}$, В | 300 | 250 | 120 | 120 |
| $I_{д}$, кА | 65 | 65 | 60 | 60 |
| $l_{д}$, мм | 280 | 230 | 100 | 100 |
| $l_{д max}$, мм | 700 | 380 | 250 | 100 |
| $h_{м}$, мм | 91 | 91 | 70 | 180 |
| $h_{ш}$, мм | 200 | 40 | 50 | 50 |

$= 1,4$ мм/кА. При этом $h_{м} = 65 \cdot 1,4 = 91$ мм. Суммарное углубление дуги в шлак и металл $h = h_{ш} + h_{м} \approx 290$ мм.

Согласно данным всех исследователей (см. табл. 1) градиенты напряжения в столбе дуги b при горении на твердую шихту находятся в интервале $10 \div 12$ В/мм, а при горении на жидкометаллическую ванну — $0,4 \div 1,2$ В/мм. Как утверждает Р. И. Спелицин, средний градиент напряжения $b = 1$ В/мм соответствует вертикальному положению дуги длиной $l_{д}$ по оси электрода, а градиент $b = 0,4 \div 0,6$ В/мм — положению дуги при ее максимальном выдувании и расположении катодного пятна на кромке торца электрода, когда ее длина $l_{д max}$ в $1,5 - 2,5$ раза больше $l_{д}$ (см. рис. 3, а). Для

электрического режима, показанного на рис. 3, а, $l_{д} = 280/1,0 = 280$ мм, $l_{д max} = 280/0,4 = 700$ мм.

Дуга загорается по оси электрода (см. рис. 3, а), затем под действием силы F_2 перемещается по торцу электрода в сторону ближайшей стены. При этом направление силы F_1 совпадает с осью дуги (см. рис. 1, а) и электрода (сначала это направление — вертикальное). В результате воздействия ее на металл в нем образуется углубление. При дальнейшем перемещении дуги к кромке электрода направление F_1 по оси дуги сохраняется, но не в вертикальном направлении, а под углом θ к оси электрода (см. рис. 3, а и рис. 4). Как видно из этих рисунков, по мере перемещения дуги от оси к кромке электрода равнодействующая электромагнитных сил F_p стремится к горизонтальному положению, т. е. способствует электромагнитному выдуванию дуги из-под электрода. Согласно выражению (4) с ростом длины дуги сила F_2 увеличивается, а следовательно, растут результирующая сила F_p и электромагнитное выдувание дуги.

Рис. 3, б соответствует работе печи на 17-й ступени, когда осуществляется выпуск шлака самотеком. При этом дуга открыта, и ее длина изменяется от 230 до 380 мм. Тепловое воздействие открытых дуг на ванну металла наименее эффективно, значительная часть их излучения направлена на водоохлаждаемые панели стен и свода. Рис. 3, в соот-

ветствует работе печи на 10-й ступени, когда длина дуги изменяется от 100 до 400 мм, а высота шлака составляет около 50 мм. С увеличением I_d в 4 раза во столько же раз возрастает F_2 , при этом дуга интенсивно выдувается из-под электрода. Формы электрода, дуги (длиной 100 мм), углубления в металле при работе на 10-й, а также на 8, 6 и 4-й ступенях показаны на рис. 3, *г*. При короткой дуге правая кромка электрода (см. рис. 3, *в*, *г*) контактирует со шлаком, металлом и разъедается ими. Торец электрода принимает горизонтальную или близкую к ней форму, дуга оказывается под электродом и распадается на несколько десятков разрядов в виде шнуров, которые распределяются по всей площади горизонтальной поверхности торца электрода. Аналогичное поведение дуги наблюдали и другие исследователи [1, 2].

Поскольку дуга не выдувается из-под электрода, ее длина остается постоянной, электромагнитная сила F_2 в процессе горения дуги не увеличивается, и результирующая электромагнитная сила F_p занимает положение, близкое к вертикальному, поддерживая таким образом вертикальное горение дуги. При таком горении дуги по зависимости I на рис. 2 для $I_d = 60$ кА находим $K_3 = 3$ мм/кА, тогда $h_m = 180$ мм. При длине вертикально горящей дуги $l_d = 100$ мм торец электрода расположен на 80 мм ниже уровня металла. Как отмечают все исследователи [1–10], тепловые характеристики работы ДСП улучшаются с заглублением дуги в ванну металла и шлак. С увеличением отношения высоты заглубления к длине дуги до 2,3–3,0 эффективность усвоения теплоты электрических дуг ванной печи возрастает до 70% [1, 2]. Это относится и к печи ДСП-150 с заглубленными дугами на 10-й ступени (см. рис. 3, *г*), где отношение $h/l_d = 230/100 = 2,3$.

Таким образом, для заглубления дуги в жидкометаллическую ванну и снижения отрицательного воздействия электромагнитного выдувания дуги необходимо выполнение следующих требований: торец электрода должен иметь горизонтальную поверхность и находиться ниже уровня ванны металла; высота заглубления дуги должна в 1,4–1,6 раза превышать ее длину. Условия выполнения на действующих ДСП первого требования неопределенны, и для их установления нужно провести дополнительные исследования. Как видно из рис. 3, *в*, *г*, при работе ДСП на одной и той же ступени и с одинаковым то-

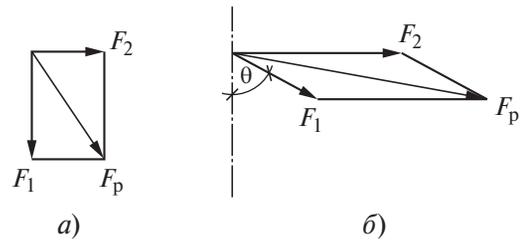


Рис. 4. Направления равнодействующей электромагнитной силы F_p короткой дуги при ее горении вертикально (а) и длинной дуги при ее горении под углом θ к оси электрода (б)

ком возможно интенсивное выдувание дуги из-под электрода (см. рис. 3, *в*) или заглубление ее в ванну металла и вертикальное горение (см. рис. 3, *г*). Во втором случае существенное влияние на происходящее оказывает горизонтальная поверхность торца электрода. Данные выводы экспериментально подтверждены также в [10], где показано, что с увеличением напряжения и длины дуги ее выдувание из-под электрода усиливается, а с ростом тока и уменьшением напряжения — уменьшается, и при определенном соотношении тока и напряжения дуги последняя оказывается под электродом и горит вдоль его оси.

Список литературы

1. Никольский Л. Е., Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. — М.: Металлургия, 1981.
2. Егоров А. В. Электросталеплавильные печи черной металлургии. — М.: Металлургия, 1985.
3. Аксиальные электродинамические силы, действующие на дугу в электродуговой печи / Н. В. Евсеева, И. В. Гончаренко, В. И. Смирнов и др. — Сб. науч. трудов “Инжиниринг, инновации, инвестиции”. — Челябинск: ЮУрГУ, 2006.
4. Макаров А. Н., Свенчанский А. Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
5. Кузнецов Л. Н., Спелицин Р. И. Современные представления о мощной электрической дуге в сталеплавильных печах. — Электротермия, 1982, № 2.
6. Макаров А. Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках. — Тверь: ТвГТУ, 2012.
7. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970.
8. Schwabe W., Robinson C. New development in UHP: theory and practice. — Congress International four electric arc achiever. Cannes, 1971.
9. Schwabe W., Robinson C. Development of large steel Furnaces from 100 to 400 ton capacity. — VII Congress International Union for Electro-Heat. Warsaw, 1972.
10. Егоров А. В. Экспериментальное изучение электродинамических явлений в мощной дуге. — Электротермия, 1963, № 12.