

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭШП НА ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА ИЗ ПРЕЦИЗИОННОГО СПЛАВА 29НК

И.В. Протокивиллов, Д.А. Петров, В.Б. Порохонько

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследовано влияние электрического напряжения, тока плавки и скорости подачи расходуемого электрода при ЭШП на особенности плавления электрода и форму торца его оплавленной части. Эксперименты проводили при ЭШП расходуемых электродов диаметром 55 мм из прецизионного сплава 29НК в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе диаметром 84 мм. Установлены зависимости тока плавки от скорости подачи электрода для разных значений электрического напряжения на ванне. Построены зависимости глубины погружения электрода в шлак и угла конуса оплавленной его части от скорости подачи электрода и напряжения. Получены количественные данные, которые могут быть использованы при выборе рациональных режимов ЭШП слитков прецизионных сплавов типа ковар диаметром 80...150 мм. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; расходуемый электрод; глубина погружения; ток плавки; напряжение; плавление; сплав

Как известно, характер плавления расходуемого электрода при ЭШП оказывает большое влияние на качество металла выплавляемых слитков. Скорость плавления электрода, процессы химического взаимодействия в пленке жидкого металла на оплавляемой его поверхности, особенности формирования и отрыва электродных капель в значительной мере определяют степень рафинирования металла от вредных примесей и неметаллических включений, а также условия кристаллизации слитка. Основные закономерности плавления расходуемого электрода при ЭШП изучены давно [1–2]. В фундаментальных работах по металлургии электрошлакового процесса отмечается, что оптимальными режимами ЭШП являются режимы, обеспечивающие форму оплавленного торца электрода в виде правильного конуса [2]. Это достигается при относительно большой глубине погружения электрода в шлак, соизмеримой с его радиусом.

Сейчас подход к оптимальным режимам плавления расходуемого электрода при ЭШП несколько изменился. С точки зрения качества металла выплавляемых слитков считается более эффективным ведение процесса ЭШП с минимальным погружением электрода в шлак, обеспечивающим формирование плоского торца расходуемого электрода [3]. Необходимо отметить, что выбор оптимальных режимов ЭШП определяется не только геометрическими параметрами расходуемого электрода и выплавляемого слитка, но и, в значительной мере, составом переплавляемого металла.

Одним из рациональных направлений использования ЭШП является выплавка слитков прецизионных сплавов [4]. К сплавам такого типа предъявляются повышенные требования по точности содержания легирующих элементов, однородности химического состава, отсутствию примесей и дефектов [5]. В свою очередь это требует тщательного выбора режимов их выплавки.

При ЭШП имеются широкие возможности управления характером плавления электрода за счет изменения технологических параметров процесса, таких как электрическое напряжение на ванне и сила тока плавки, которые определяют мощность переплава. Кроме этих параметров важной характеристикой процесса ЭШП является скорость переплава, которая кроме электрических режимов плавки определяется еще скоростью подачи расходуемого электрода в шлаковую ванну. Следует отметить, что упомянутые параметры тесно связаны друг с другом и изменение одного влечет за собой изменение другого.

В связи с этим выбор рациональных режимов переплава прецизионных сплавов, в частности сплава 29НК (ковар), потребовал изучения особенностей плавления расходуемого электрода при различных режимах его переплава.

Цель данной работы заключалась в изучении влияния таких технологических параметров, как ток и напряжение плавки, а также скорость подачи электрода на особенности плавления и профиль торца оплавленной части расходуемого электрода из прецизионного сплава 29НК.

Методика проведения экспериментов. Эксперименты проводили в электрошлаковой печи камерного типа в атмосфере аргона. Электроды

И.В. Протокивиллов — <https://orcid.org/0000-0002-5926-4049>

В.Б. Порохонько — <https://orcid.org/0000-0002-6490-7221>

© И.В. Протокивиллов, Д.А. Петров, В.Б. Порохонько, 2019

Режимы плавки и параметры плавления электрода

Номер плавки	U , В	I , А	$V_{эл}$, м/ч	Угол конуса оплавленной части электрода (α), град	Глубина погружения электрода в шлак ($H_{эл}$), мм	Характеристика процесса
323	20	1650	0,65	123	22,7	устойчивый
324		2640	1,25	95	36,6	—»—
325		3700	2,00	86	46,8	—»—
326	30	1500	0,70	147	16,5	неустойчивый, периодический
327		1650	1,25	137	18,3	устойчивый
328		2970	2,00	125	21,3	—»—
329		3960	2,60	110	24,0	—»—
330		4780	3,30	103	28,0	—»—
337		6450	3,84	86	43,6	относительно устойчивый
331	38	1155	1,25	153	15,0	устойчивый на поверхности
332		1600	2,00	145	16,5	—»—
333		3135	2,60	130	17,4	устойчивый
334		4290	3,30	125	20,0	—»—
335		5115	3,70	115	24,0	—»—
336		7090	4,68	110	28,3	—»—

диаметром 55 мм из сплава 29НК (Fe–29Ni–17Co) переплавляли в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе диаметром 84 мм. Размеры электрода и кристаллизатора выбраны исходя из конкретных задач по переплаву заготовок из сплава 29НК. В качестве флюса использовали фторидно-хлоридный флюс АН-Т4. Глубина шлаковой ванны во всех экспериментах составляла 45 мм. Плавки проводили при электрическом напряжении (U) на ванне величиной 20, 30 и 38 В. Скорость подачи электрода ($V_{эл}$) меняли в пределах 0,60...4,68 м/ч. Режимы плавки приведены в таблице.

Плавки осуществляли следующим образом. После наведения шлаковой ванны и выхода на заданный стационарный режим плавления электрода отключали напряжение и резко поднимали электрод до его выхода из шлаковой ванны. Это позволяло фиксировать форму оплавленной части электрода и глубину его погружения в шлак.

Результаты экспериментов. Результаты экспериментов приведены в таблице и на рис. 1–6.

На рис. 1 представлены зависимости тока плавки от скорости подачи электрода для различных значений напряжения. Как видно, величина тока при прочих равных условиях, линейно растет с увеличением скорости подачи электрода. Известно, что это связано с увеличением глубины погружения электрода в шлак и уменьшением сопротивления межэлектродного промежутка.

При неизменной скорости подачи электрода увеличение напряжения на ванне сначала приводит к увеличению тока плавки, а затем, с установлением стационарных режимов, область плавления электрода смещается в верхние слои шлаковой ванны и ток плавки уменьшается. Это

подтверждают данные, приведенные на рис. 1, показывающие, что при заданной скорости подачи электрода меньшим значениям напряжения соответствуют более высокие значения тока плавки.

Внешний вид оплавленных торцов электродов приведен на рис. 2. При малых скоростях подачи электрода, которые обуславливают малый ток плавки, плавление электрода происходит в верхних слоях шлаковой ванны, торец электрода имеет плоскую форму с одним или несколькими (реже) очагами каплеобразования (рис. 2, плавки 323, 326, 331).

При увеличении скорости подачи электрода глубина его погружения в шлак увеличивается, а торец приобретает коническую форму (рис. 2, плавки 334, 329, 330, 336). Формирование и отрыв капель электродного металла при этом происходит на вершине конуса оплавления. Дальнейшее увеличение скорости подачи электрода приводит к увеличению его конусной части и, соответственно, к уменьшению угла α вершины конуса оплавления (рис. 3).

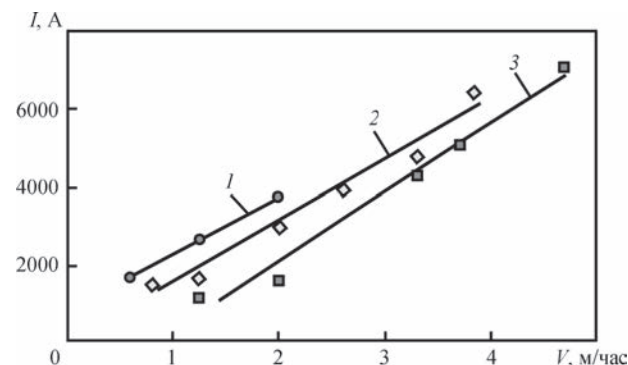


Рис. 1. Зависимость тока плавки от скорости подачи электрода при различных значениях напряжения, В: 1 — 20; 2 — 30; 3 — 38

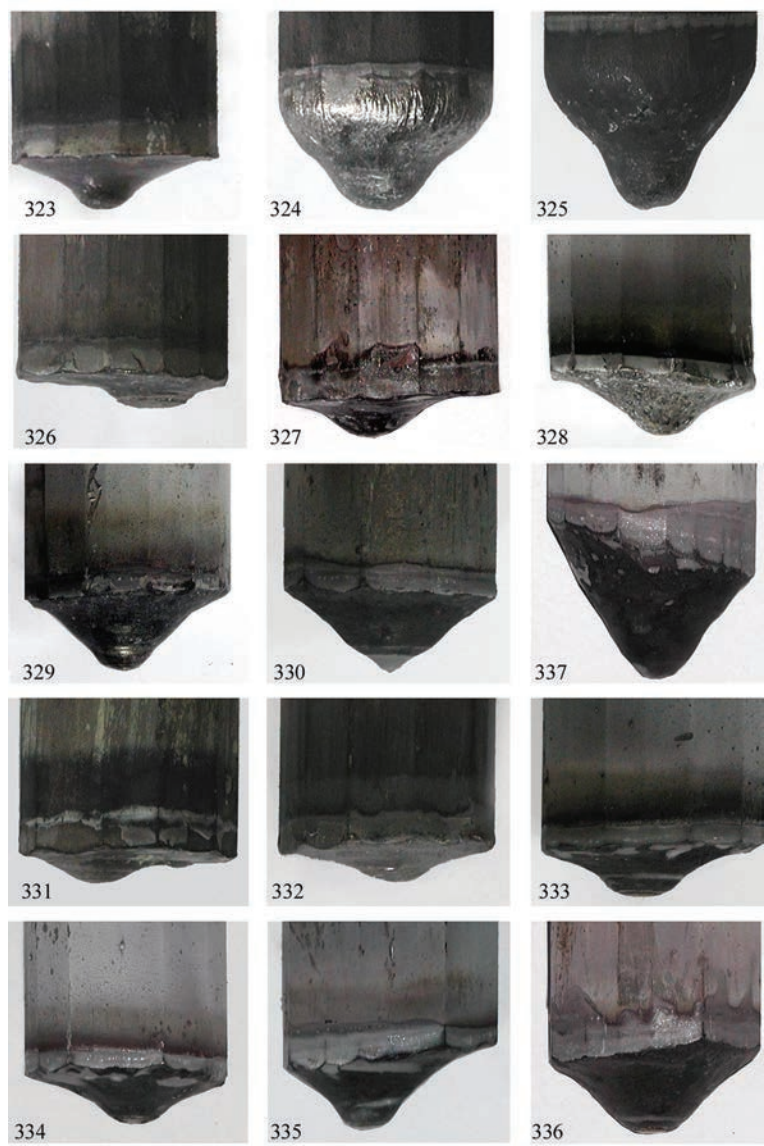


Рис. 2. Внешний вид оплавленных торцов электродов при различных режимах плавки (цифрами 323–337 указаны номера плавок, см. таблицу)

Проведенные эксперименты показали, что предельно допустимые значения скорости подачи электрода составляют при напряжениях, В: 20 — 2,6; 30 — 3,9; 38 — 4,7 м/ч. Увеличение скорости пода-

чи выше указанных значений приводит к коротким замыканиям на металлическую ванну и нарушению устойчивости электрошлакового процесса.

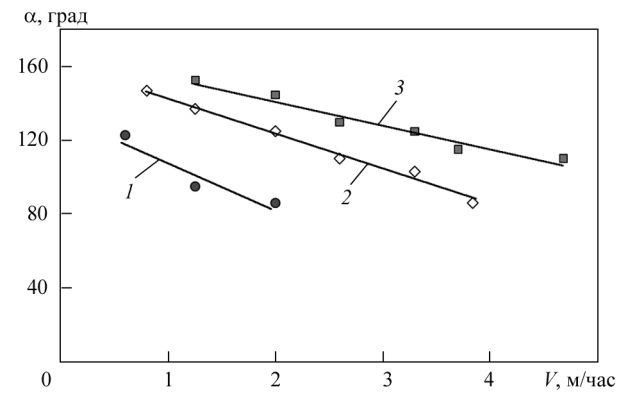


Рис. 3. Зависимость угла (α) вершины конуса оплавленной части электрода от скорости его подачи при различных значениях напряжения, В: 1 — 20; 2 — 30; 3 — 38

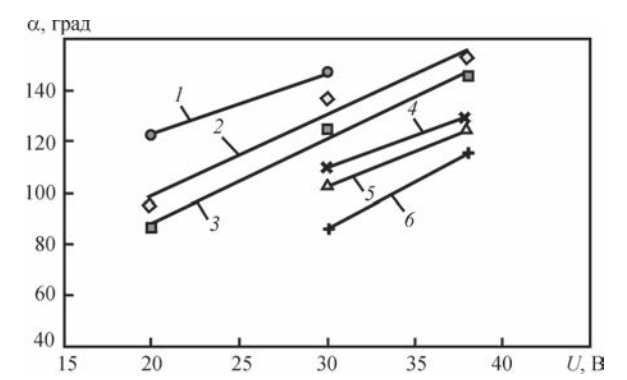


Рис. 4. Зависимость угла (α) конуса оплавленной части электрода от напряжения плавки при разных скоростях подачи электрода, м/ч: 1 — 0,6; 2 — 1,25; 3 — 2,0; 4 — 2,6; 5 — 3,3; 6 — 3,8

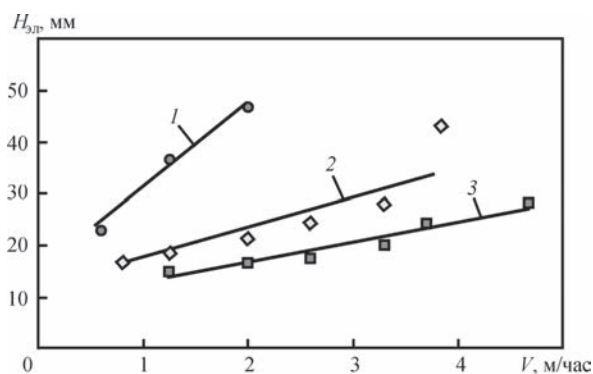


Рис. 5. Зависимость глубины погружения электрода ($H_{эл}$) в шлак от скорости подачи при различных значениях напряжения, В: 1 — 20; 2 — 30; 3 — 38

В целом зависимость глубины погружения электрода в шлак от скорости его подачи носит линейный характер (рис. 5). При этом практически во всех случаях, даже при небольшой скорости подачи, электрод, помимо оплавленной конической части, погружался в ванну еще и цилиндрической частью, которая не оплавляется (рис. 2, плавки 323, 326).

При увеличении напряжения и неизменной скорости подачи электрода глубина погружения его в шлак уменьшается и торец приобретает более плоскую форму (рис. 2, плавка 331 по сравнению с 323). Соответственно угол α с увеличением напряжения на ванне увеличивается (см. рис. 4). При этом зависимость глубины погружения электрода в шлак от напряжения имеет нелинейный характер (рис. 6).

Следует отметить, что одинаковая форма оплавленной поверхности электрода может быть получена при существенно отличающихся электрических режимах плавки и мощности. Так, к примеру, практически одинаковый торец электрода был при плавках 323 ($U = 20$ В, $I = 1650$ А, $V_{эл} = 0,65$ м/ч) и 334 ($U = 38$ В, $I = 4290$ А, $V_{эл} = 3,3$ м/ч) (см. рис. 2). Очевидно, что определяющим показателем здесь является удельная мощность переплава, то есть мощность процесса, отнесенная к скорости переплава.

Также необходимо обратить внимание на несимметричный характер плавления электрода, наблюдавшийся в ряде случаев (рис. 2, плавки 238, 337, 335, 336). В большей степени он проявлялся при высоких значениях тока плавки. Этот эффект вызван рядом факторов.

Прежде всего он может быть связан с незначительной несоосностью электрода и кристаллизатора. В результате этого нарушается осевая симметрия электрического поля в шлаковой ванне и часть тока, протекающая по цепи кристаллизатора, концентрируется в участках с минимальным зазо-

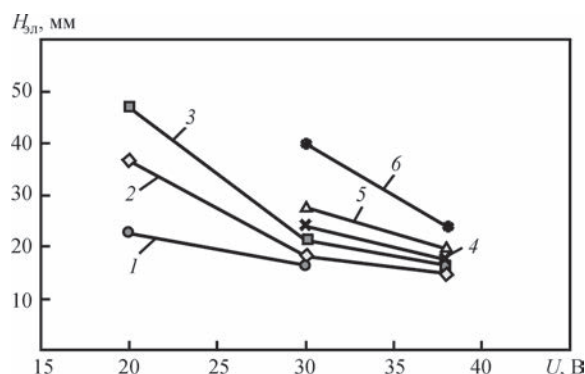


Рис. 6. Зависимость глубины погружения электрода ($H_{эл}$) в шлак от напряжения при разных скоростях подачи электрода, м/ч: 1 — 0,6; 2 — 1,25; 3 — 2,0; 4 — 2,6; 5 — 3,3; 6 — 3,8

ром между электродом и кристаллизатором. Соответственно в этих участках электрод оплавляется более интенсивно. Кроме того, несимметричный характер плавления электрода может быть вызван электромагнитным дутьем, вызванным несимметричным подводом электрического тока к поддону и электроду. Такой характер плавления электрода является нежелательным, поэтому нужно принимать соответствующие меры для его устранения.

Заключение

Полученные в результате проведенных экспериментов данные совпадают с известными представлениями о характере плавления расходующего электрода при различных режимах ЭШП. При этом необходимо отметить, что полученные данные справедливы лишь для электродов относительно небольших размеров. При переплаве электродов диаметром 200 мм и выше характер их плавления, особенно при невысоких удельных мощностях переплава, может существенно отличаться. Это будет проявляться, прежде всего, в наличии большого количества очагов каплеобразования на оплаиваемой поверхности электрода [6].

При производстве прецизионных сплавов зачастую нет необходимости в изготовлении многотоннажных слитков, а требуется выплавка слитков относительно небольших размеров. В связи с этим, полученные в результате проведенных экспериментов количественные данные представляют практический интерес и могут быть использованы при выборе рациональных режимов ЭШП слитков прецизионных сплавов типа 29НК диаметром 80...150 мм.

Список литературы

1. Медовар Б.И., Цыкуленко А.К., Шевцов В.Л. и др. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Наукова думка.
2. Латаш Ю.В., Медовар Б.И. (1970) *Электрошлаковый переплав*. Москва, Металлургия.

3. Медовар Л.Б., Лебедь В.А., Стовпченко А.П. и др. (2012) О реконструкции печей ЭШП. *Современная электрометаллургия*, **4**, 3–6.
4. Протокилов И.В., Петров Д.А., Порохонко В.Б. (2016) Электрошлаковый переплав отходов прецизионных сплавов. *Современная электрометаллургия*, **2**, 18–22.
5. Грицианов Ю.А., Путимцев Б.Н., Молотиллов Б.В. (1975) *Металлургия прецизионных сплавов*. Москва, Металлургия.
6. Kharicha A., Ludwig A., Wu M. (2011) Simulation of the melting during an industrial scale electro-slag remelting process. *LMPC 2011, Nancy, France*, pp. 41–48.

References

1. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Shevtsov, V.L. et al. (1986) *Metallurgy of electros slag process*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

2. Latash, Yu.V., Medovar, B.I. (1970) *Electroslag remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Medovar, L.B., Lebed, V.A., Stovpchenko, A.P. et al. (2012) About reconstruction of ESR furnaces. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 3–5 [in Russian].
4. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B. (2016) Electroslag remelting of wastes of precision alloys. *Ibid.*, **2**, 18–22 [in Russian].
5. Gritsianov, Yu.A., Putimtsev, B.N., Molotilov, B.V. (1975) *Metallurgy of precision alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Kharicha, A., Ludwig, A., Wu, M. (2011) Simulation of the melting during an industrial scale electros slag remelting process. *LMPC 2011, Nancy, France*, 41–48.

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕШП НА ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВЛЕННЯ ВИТРАТНОГО ЕЛЕКТРОДУ З ПРЕЦИЗІЙНОГО СПЛАВУ 29НК

І.В. Протоковілов, Д.А. Петров, В.Б. Порохонько

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджено вплив електричної напруги, струму плавки і швидкості подачі витратного електроду при ЕШП на особливості плавлення електроду і форму торця його оплавленої частини. Експерименти проводили при ЕШП витратних електродів діаметром 55 мм з прецизійного сплаву 29НК в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі діаметром 84 мм. Встановлено залежності струму плавки від швидкості подачі електроду для різних значень електричної напруги на ванні. Побудовано залежності глибини занурення електроду в шлак і кута конусу оплавленої його частини від швидкості подачі електроду і напруги. Отримано кількісні дані, що можуть бути використані при виборі раціональних режимів ЕШП зливків прецизійних сплавів типу ковар діаметром 80...150 мм. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; витратний електрод; глибина занурення; струм плавки; напруга; плавлення; сплав

EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ESR ON THE FEATURES OF MELTING OF CONSUMABLE ELECTRODE FROM PRECISION ALLOY 29NK

I.V. Protokovilov, D.A. Petrov, V.B. Porokhonko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Effect of electric voltage, melting current and consumable electrode feed rate in ESR on the features of electrode melting and shape of its molten part was studied. Experiments were conducted at ESR of consumable electrodes of 55 mm diameter from precision alloy 29NK in a copper water-cooled mould of 84 mm diameter. Dependencies of melting current on electrode feed rate were established for different values of electric voltage in the pool. Dependencies of the depth of electrode immersion into slag and angle of cone of its molten part on electrode feed rate and voltage were plotted. Quantitative data were obtained, which can be used at selection of rational modes of ESR of ingots of 80...150 mm diameter from precision alloys of kovar type. Ref. 6, Tabl. 1, Fig. 6.

Key words: electros slag remelting; consumable electrode; immersion depth; melting current; voltage; melting; alloy

Поступила в редакцію 01.10.2019



НОВАЯ КНИГА

Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 642 с. ISBN 978-617-7015-74-0

В открытом доступе по ссылке

https://patonpublishinghouse.com/compilations/Krivtsun_Sbornik_2018_small.pdf