



УДК 621.746.047:669.054.2

В.П. Анцупов, М.И. Ячиков, И.М. Ячиков
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: jachikov@mail.ru
Дата поступления 18.12.2020

ПЕРЕРАБОТКА В ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ПЕЧИ ПЕРЕПЛАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОДА ИЗ ОТРАБОТАННЫХ ДИСКОВЫХ НОЖЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ

Аннотация

В металлургическом производстве образуется большое количество легированного лома. Одной из его разновидностей являются отходы, образующиеся из вышедших из строя дисковых отработанных ножей для резки металла. Предлагается технология их вторичной переработки, включающая изготовление переплавляемых электродов из отработанных ножей одного типоразмера и получение заготовки путем переплава в электрошлаковой печи с внутренним кристаллизатором. Для формирования цилиндрического переплавного электрода с целью лучшего теплового и электрического контакта диски прижимают друг к другу под давлением не менее 1 МПа и приваривают их между собой с помощью дуговой аргоновой или плазменной сварки. Изготовленный подобным образом из отработанных дисковых ножей электрод обладает анизотропией свойств. Показана методика расчета эффективного коэффициента теплопроводности и изменения удельного электрического сопротивления в осевом направлении электрода с учетом передачи тепла и электрического тока через зону контакта двух металлических дисков.

Ключевые слова: дисковые ножи по металлу, электрошлаковый переплав, легированная сталь, переплавляемый электрод, анизотропия свойств, эффективный коэффициент теплопроводности, контактное давление.

Введение

В прокатном производстве дисковые ножи применяют на дисковых ножницах при продольной резке и обрезке кромки листов и рулонной полосы металла на определенную ширину. Дисковый нож имеет круглую форму, изготавливается из материала высокой прочности и имеет по периметру режущую кромку. Для посадки на ось вращения в центре дискового ножа имеется отверстие, которое может быть выполнено как с пазами, так и с выступами, при этом ширина его кромки может варьироваться. Дисковые ножи могут изготавливаться из штамповочной, быстрорежущей, инструментальной и легированной сталей. Наибольшее распространение получили легированные инструментальные стали 9ХС, 9ХФ, ХВСГ, 6ХВ2С и др. [1].

На металлургических предприятиях существует проблема переработки и использования вторичного стального лома. В прокатном производстве имеется большое количество легированного лома в виде отходов, образующиеся из отработанных ножей для резки металла, причем до 70% составляют вышедшие из строя дисковые ножи.

Используемые в настоящее время дисковые ножи для резки металла имеют 40 типоразмеров с наружным диаметром $D=125-370$ мм, с посадочным отверстием $d=40-240$ мм и высотой $B=6-30$ мм по ТУ 14-1-1146-74 из легированных сталей твердостью 50–61 HRC (по Роквеллу) (рисунок 1). Основные размеры стандартных дисковых ножей с внешним диаметром до 400 мм сведены в таблице 1.

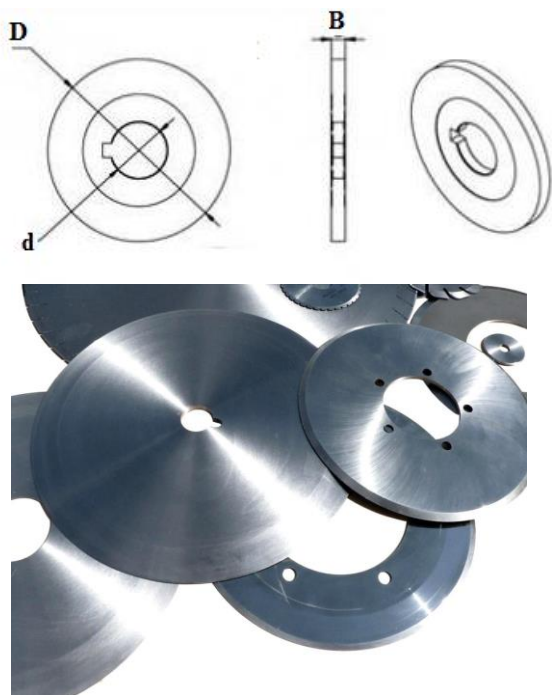


Рисунок 1. Основные размеры дисковых ножей по металлу

В настоящее время производство и переработка отработанных ножей чаще всего протекает по следующей технологической карте [2]:

- плавка стали в электрических печах;
- разливка металла для формирования электродов ЭШП;
- переплав электродов в ЭШП и получение заготовок;
- механическая обработка заготовок дисковых ножей;
- термическая обработка (отжиг);
- механическая обработка;
- закалка с высоким отпуском.

Таблица 1
Типоразмеры стандартных дисковых ножей диаметром до 400 мм (мм)

<i>D</i>	<i>d</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>d</i>	<i>B</i>
260	120	20	350	240	20
260	150	20	360	150	20
260	150	30	360	150	30
270	150	20	360	220	30
275	125	20	370	210	20
300	150	20	370	240	20
300	175	16	370	240	30
350	200	30			

Из рассмотренной технологической схемы видно, что имеется двойной переплав получаемой заготовки. Возникает вопрос о возможности получения требуемой заготовки в установке ЭШП в одну стадию. Поставленная задача наталкивается, прежде всего, на проблему изготовления переплавного электрода.

В настоящее время наиболее распространенным способом получения расходных электродов ЭШП является процесс прессования металлической шихты, имеющий ряд недостатков. Неоднократно предпринимались попытки усовершенствования технологии прессования, конструкций прессовых установок и инструментальной наладки. Однако основными недостатками существующей схемы, связанной с прессованием, остаются наличие дорогого прессовального оборудования, недостаточная прочность получаемых электродов, возможность возникновения трещин [3, 4].

В данной работе предлагается получение переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей. Они практически полностью сохраняют типоразмеры стандартных дисковых ножей с тем отличием, что за счет износа внешний диаметр ножей уменьшается на $\Delta_{\text{изн}} = 3\text{--}5$ мм.

При наличии большого количества отработанных ножей предлагается переплавляемые электроды для ЭШП изготавливать из ножей одного типоразмера. Цилиндрический электрод получают путем прижатия отработанных ножей друг к другу под давлением не менее 1 МПа для лучшего теплового и электрического контакта, и далее приваривают диски ножей с помощью аргоновой или плазменной сварки. В зависимости от используемого размера отработанных ножей делают 3–5 сварных швов вдоль образующей цилиндра электрода (рисунок 2, а), либо проводят точечную сварку в 3–5 точках по внешней окружности контакта дисковых ножей (рисунок 2, б).

Сварку производят при обычном атмосферном давлении, при этом плотность энергии в дуге (тепловой поток) примерно такая же, как при обычной дуговой сварке. При этом сварочную ванну защищают от

действия кислорода воздуха аргоном, используя вольфрамовый электрод, который практически не расходится. Плазменную сварку выполняют с помощью плазмотора, в котором дуга горит в атмосфере аргона повышенного давления. При этом в аргоновой струе достигают температуры до 12 тысяч градусов Цельсия в узком столбе

плазмы. В отличие от свободной дуги плазменная струя имеет практически цилиндрическую форму, создает давление на металл в 5–8 раз больше, при этом тепловая энергия вся сосредоточена в тонкой струе плазмы и нагрев металла происходит только в области сварки.

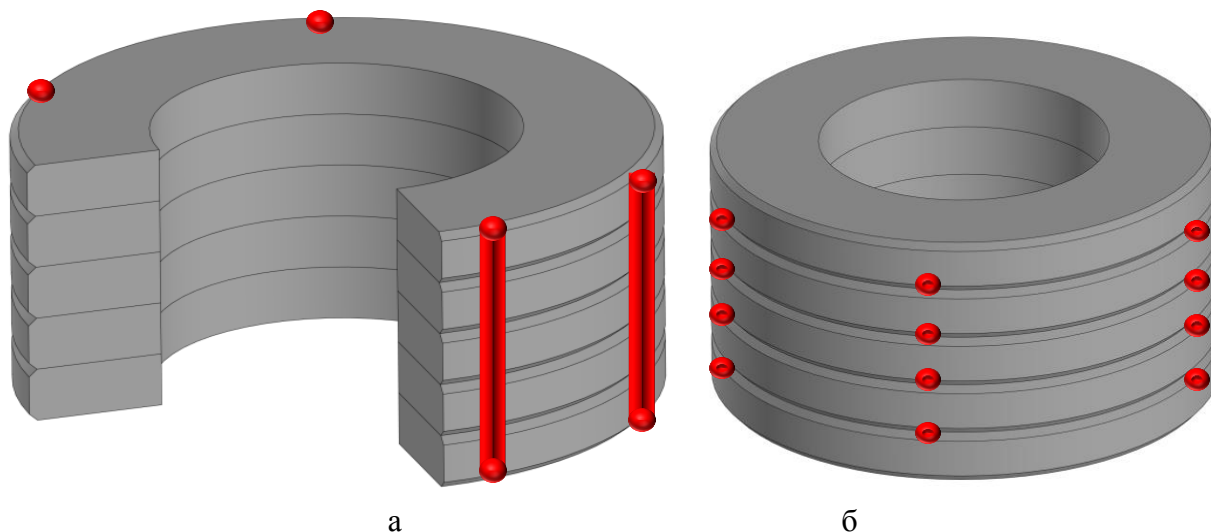


Рисунок 2. Изготовление переплавляемого электрода:

- а – путем нанесения сварных швов вдоль образующей цилиндра электрода;
 б – путем точечной сварки по внешней окружности в местах контакта дисковых ножей

Расчет геометрии и свойств переплавляемого электрода, полученного из отработанных дисковых ножей

Рассмотрим расчет геометрии и свойств переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей и его переплав в электрошлаковой печи с внутренним кристаллизатором – дорном, предназначенным для формирования полости в выплавляемой заготовке.

Исходными данными являются размеры получаемой заготовки – ее внешний, внутренний диаметр и высота: $D_3=350\text{--}500$ мм; $d_3=150\text{--}240$ мм; $H_3=720$ мм. Определим суммарную длину h переплавляемого электрода при переплаве отработанных ножей заданного диаметра D . По уравнению непрерывности

$$\gamma_{\text{т}} \pi \left((D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2 \right) \frac{h}{4} = \gamma_{\text{т}} \pi \left(D_3^2 - d_3^2 \right) \frac{H_3}{4},$$

получим
$$h = H_3 \frac{(D_3^2 - d_3^2)}{\left((D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2 \right)}. \quad \text{При}$$

ЭШП имеют место потери на угар металла

электрода, составляющие примерно 1%, с учетом этого необходимая минимальная длина переплавляемого электрода

$$h_3 = 1,01h = 1,01 \cdot H_3 \frac{(D_3^2 - d_3^2)}{\left((D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2 \right)}. \quad (1)$$

Для примера возьмем следующие исходные данные: размеры получаемой заготовки $D_3=384$ мм, $d_3=220$ мм, $H_3=720$ мм; размеры переплавляемых ножей $D=370$ мм, $d=240$ мм, $\Delta_{\text{изн}}=5$ мм. Поперечный размер переплавляемого электрода составляет 370 мм и равен внешнему диаметру ножей, определим минимальную длину h_3 переплавляемого электрода. По уравнению непрерывности (1), получим $h_3 \approx 953$ мм.

На ПАО «ММК» для изготовления ножей используют сталь 6ХВ2С. Ее теплофизические свойства при комнатной температуре: плотность $\gamma_{\text{т}}=7800$ кг/м³; теплоемкость $c_{\text{т}}=460$ Дж/(кг·К), изотропная теплопроводность – $\lambda_{\text{т}} = 40$ Вт/(м·К).

Электрод, изготовленный из отработанных дисковых ножей, обладает анизотропией свойств. Определим эффективный

коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ в осевом направлении с учетом передачи тепла через зону контакта двух металлических дисков. Тепловой поток q , проходящий вдоль оси цилиндра, определяется термическим сопротивлением самого металла и термическим контактным сопротивлением R_k , возникающем при неплотном контакте двух металлических пластин.

Полное термическое сопротивление $R = R_k + B/\lambda_{тр}$, где B – толщина диска. Тепловой поток при перепаде температур Δt :

$$q = \lambda_{эф} \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda_{эф} \frac{\Delta t}{\Delta x} = \lambda_{эф} \frac{\Delta t}{B + \delta_1}.$$

Принимая во внимание, что при плотном прижатии двух металлических дисков величина микрозазора $\delta_1 \ll B$, напишем выражение для определения эффективного коэффициента теплопроводности в осевом направлении

$$\lambda_{эф} = \frac{B}{R} = \frac{B}{R_k + \frac{B}{\lambda_{тр}}}. \quad (2)$$

Для нахождения термического контактного сопротивления R_k используем выражение для трех термических сопротивлений, действующих параллельно

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_l}, \quad (3)$$

где R_m – термическое сопротивление фактического контакта, передающегося теплопроводностью через металл; R_g – термическое сопротивление межконтактной среды через микрозазоры, в которых находится воздух; R_l – термическое сопротивление за счет излучения. Обычно излучение учитывают при разнице температур между контактирующими поверхностями $\Delta t = t_1 - t_2 > 700^\circ$ и когда используются материалы, имеющие низкую теплопроводность. В нашем случае, при контакте двух металлов с относительно высокой теплопроводностью этой величиной можно пренебречь, получим

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_g}. \quad (4)$$

При рассмотрении процесса передачи тепла через зону контакта двух твердых тел

обычно принимают ряд допущений [5]. С их учетом для определения термического сопротивления фактического контакта воспользуемся выражением, полученным в работе [6]

$$\frac{1}{R_m} = 2,12 \cdot 10^4 \lambda_{тр} \left(\frac{p}{E} B_n \right)^{0,8}, \quad (5)$$

где p – давление в контакте, Н/м²; E – модуль упругости металла (модуль Юнга), его значение с увеличением температуры уменьшается (табл. 2).

Эмпирическая зависимость (5) выведена путем обработки данных, полученных при анализе поперечных и продольных профилеграмм с поверхностями с чистотой обработки 3–10 класса, для материалов с модулем Юнга $E > 7 \cdot 10^{10}$ Н/м² и относительных нагрузках на контактные поверхности $p/E = 5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 2

Модуль Юнга в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	100	200	300	400	500	600
$E, \text{ ГПа}$	215	212	210	205	200	190	180	170

Коэффициент B_n характеризует геометрические свойства контактирующих поверхностей и зависит от суммы средних высот выступов микронеровностей контактирующих поверхностей $h_\Sigma = h_{cp1} + h_{cp2} = 2h_{cp}$.

График зависимости $B_n(h_\Sigma)$, приведенный в работе [5], был аппроксимирован в виде полинома второй степени

$$B_n = 27,106 - 0,5518 h_\Sigma + 0,0052 h_\Sigma^2, \quad (6)$$

где величина h_Σ задается в мкм. Средняя высота неровностей h_{cp} зависит от класса чистоты обработки поверхности согласно ГОСТ 2789-59.

Термическое сопротивление межконтактной среды зависит от теплопроводности воздуха между дисками λ_g (при средней температуре контакта поверхностей) и от величины m , являющейся коэффициентом заполнения профиля

$$\frac{1}{R_g} = \frac{\lambda_g}{h_\Sigma(1-m)}. \quad (7)$$

Графическая зависимость $(1-m)$ от суммарной величины средних высот микровыступов h_Σ , приведенная в работе [6],

была аппроксимирована следующим уравнением

$$1 - m = 0,4154 + 8,1 \cdot 10^{-3} h_{\Sigma} - 9 \cdot 10^{-5} h_{\Sigma}^2. \quad (8)$$

Для определения теплопроводности воздуха в диапазоне температур 0–1200°C было использовано уравнение [7]

$$\lambda_6(t) = 2,54 \cdot 10^{-2} + \left(\frac{Bm}{m \cdot \text{град}} \right) + 7 \cdot 10^{-5} t - 1,4 \cdot 10^{-8} t^2. \quad (9)$$

Изотропный коэффициент теплопроводности металла также является функцией температуры

$$\lambda_{\text{т}}(t) = 40,1 - 0,0144 \cdot t - \left(\frac{Bm}{m \cdot \text{град}} \right) - 1,583 \cdot 10^{-5} \cdot t^2. \quad (10)$$

На основе математической модели (2) – (10) проведено компьютерное моделирование изменения эффективного коэффициента теплопроводности от параметров, влияющих на контактное термическое сопротивление. На рисунке 3,а показана зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры при разных давлениях между дисками. Расчет проведен при толщине диска $B=20$ мм и 6 классе чистоты поверхности ($h_{\Sigma}=20$ мкм). Видно, что эффективная теплопроводность падает с увеличением температуры и растет с увеличением контактного давления и повышением чистоты обработки металла (рисунок 3,б). Последнее можно объяснить большей площадью микроконтактов при соприкосновении двух поверхностей.

Для дальнейших тепловых расчетов определим среднеинтегральные эффективные коэффициенты теплопроводности при $p=1$ МПа в диапазоне температур от 0 до 800°C как $\bar{\lambda}_{\text{эф}} = \frac{1}{800} \int_0^{800} \lambda_{\text{эф}}(t) dt$, в результате

расчета получим:

при $h_{\Sigma}=40$ мкм $\bar{\lambda}_{\text{эф}}=7,8$ Вт/(м град);

при $h_{\Sigma}=20$ мкм $\bar{\lambda}_{\text{эф}}=9,33$ Вт/(м град);

при $h_{\Sigma}=10$ мкм $\bar{\lambda}_{\text{эф}}=10,4$ Вт/(м град);

при $h_{\Sigma}=5$ мкм $\bar{\lambda}_{\text{эф}}=10,96$ Вт/(м град).

Средняя теплопроводность в этом диапазоне температур литого металла $\bar{\lambda}_{\text{т}} \approx 30,9$ Вт/(м град).

При соприкосновении двух металлических дисков возникает дополнительное электрическое сопротивление R_k , называемое контактным сопротивлением. Оно состоит из двух частей $R_k = R_{\text{пл}} + R_{\text{п}}$. Первая составляющая $R_{\text{пл}}$ сопротивления вызывается поверхностными пленками на контактных поверхностях и препятствующих протеканию тока. Вторая составляющая $R_{\text{п}}$ определяется наличием шероховатостей на поверхности металла, в результате, соединенные в стык проводники соприкасаются лишь в отдельных точках, аналогично процессу передаче тепла через зону теплового контакта. В первом приближении можно считать, что $R_{\text{пл}}$ и $R_{\text{п}}$ не зависят друг от друга.

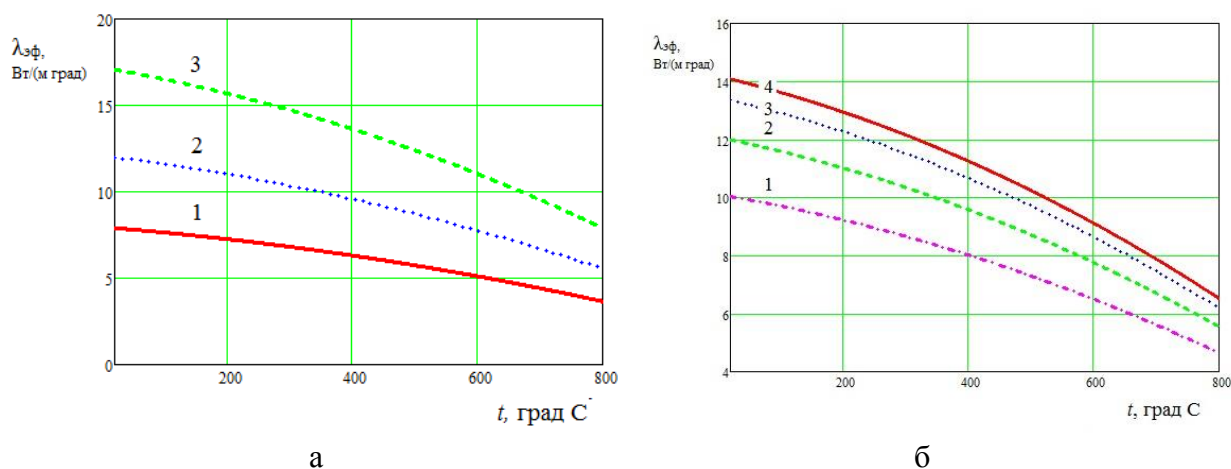


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры:
 а – при давлении между дисками: 1 – 0,5 МПа; 2 – 1 МПа; 3 – 2 МПа;
 б – при разных классах чистоты обработки поверхности ($p=1$ МПа): 1 – 5 класс ($h_{\Sigma}=40$ мкм);
 2 – 6 класс ($h_{\Sigma}=20$ мкм); 3 – 7 класс ($h_{\Sigma}=10$ мкм); 4 – 8 класс ($h_{\Sigma}=5$ мкм)

Если пренебречь $R_{пл}$ и считать, что при прижатии двух дисков наблюдается только упругая деформация металла, то переходное сопротивление можно определить по формуле, предложенной в работе [8]

$$R_{п} = \frac{0,12 \cdot \rho \cdot E \cdot h_{ср}}{Q(1-\mu)}, \quad (11)$$

где ρ – удельное сопротивление металла; $\mu=0,28-0,33$ – коэффициент Пуассона стали; E – модуль упругости;

$h_{ср}$ – средняя высота микронеровностей контактирующих поверхностей;

$Q = p \cdot f$ – усилие контактного нажатия при давлении сжатия p . Площадь контакта $f = \pi((D - \Delta_{из})^2 - d^2)$.

Полное электрическое сопротивление с учетом контактного сопротивления можно записать как $R' = \frac{\rho}{f} \left(B + \frac{0,12 \cdot E h_{ср}}{p(1-\mu)} \right)$

Эффективное удельное сопротивление

$$\rho_{эф} = \frac{R'f}{B} = \rho \left(1 + \frac{0,12 \cdot E h_{ср}}{B \cdot p(1-\mu)} \right). \quad (12)$$

Отсюда относительное увеличение удельного сопротивления

$$K_{эф} = \frac{\rho_{эф}}{\rho} = \left(1 + \frac{0,12 \cdot E h_{ср}}{B \cdot p(1-\mu)} \right). \quad (13)$$

При $E=10^5$ МПа, $p=1$ МПа, $\mu=0,3$, $B=20$ мм получим:

при $h_{ср}=20$ мкм $K_{эф}=18$; при $h_{ср}=10$ мкм

$K_{эф}=9,6$; при $h_{ср}=5$ мкм $K_{эф}=5,3$; при

$h_{ср}=2,5$ мкм $K_{эф}=3,1$. Видно, что из-за нали-

чия контактного сопротивления увеличивается эффективное удельное сопротивление,

а значит и объемное тепловыделение в переплавленном электроде при прохождении по

нему тока I : $q_v = \rho \cdot J^2$, где

$J = I/f$ – средняя плотность тока через электрод.

При рассмотренных параметрах объемное тепловыделение в переплавленном электроде увеличивается в $K_{эф}$ раз.

Посмотрим, насколько это скажется на тепловом состоянии составного электрода. Удельное сопротивление стали с возрастанием температуры растет линейно [9]

$$\rho_t = \rho(1 + \alpha_t(t - 20)), \quad (14)$$

где $\rho=(0,1-0,13)10^{-6}$ Ом м, $\alpha_t=(1-4)10^{-3}$ град $^{-1}$ – температурный коэффициент электрического сопротивления. При $\rho=0,11 \cdot 10^{-6}$ Ом м, $\alpha_t=2 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$ при $t=500^{\circ}\text{C}$ имеем $\rho_t \approx 2 \cdot 10^{-7}$ Ом м.

При максимальном токе печи ЭШП $I=20$ кА имеем плотность тока $J = I/f \approx 8,4$ А/см 2 , где площадь контакта $f \approx 0,238$ м 2 .

Найдем объемное тепловыделение в литом электроде

$q_v = \rho_t J^2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 8,4 \cdot 10^8 \approx 168$ Вт/м $^3=0,000168$ Вт/см 3 и электроде, полученном из отработанных ножей, при $K_{эф}=20$

$q_v = K_{эф} \rho_t J^2 \approx 3360$ Вт/м $^3=0,00336$ Вт/см 3 .

Полученные оценки говорят о том, что тепловыделением за счет джоулева тепла в электроде, полученном из отработанных ножей, можно пренебречь.

Выводы

1. Предложена схема переработки отработанных дисковых ножей путем получения электрода из ножей одного типоразмера для дальнейшего переплава в установке ЭШП.
2. Показана методика расчета минимальной длины переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей для получения полой заготовки заданной длины, с внешним и внутренним диаметром, определяемые конструкцией внешнего и внутреннего кристаллизаторов.
3. Установлено наличие анизотропии теплопроводности и электропроводности в получаемых переплавленных электродах в осевом и радиальном направлениях. Для составного электрода средняя теплопроводность в осевом направлении в зависимости от свойств поверхности дисков снижается в 3–4 раза, а удель-

ное электрическое сопротивление увеличивается примерно в 3 раза по сравнению с литым металлом. При существующих плотностях тока через электроды джоулевым тепловыделением в электроде из отработанных ножей можно пренебречь.

Библиографический список

1. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М: Машиностроение, 1982. – 320 с.
2. Вдовин К.Н., Ячиков М.И., Юсин А.Н., Позин А.Е., Русин Е.А. Переплав ножевых марок сталей методом ЭШП // Теория и технология металлургического производства, 2017, №1 (20) – С. 23–26.
3. Логинов Ю.Н., Карсаков В.В., Хайкин Б.Е. Сокращение образования трещин на поверхности расходуемых титановых электродов. Технология легких сплавов, 1984. № 6. С. 62–64.
4. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. Designing refractories for the tundish of a continuous caster Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Т. 56. № 6. С. 569–573.
5. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А. Контактный теплообмен, Госэнергоиздат, 1963. – 280 с.
6. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М., Энергия, 1971. – 216 с.
7. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. –720 с.
8. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А., Иванова Н.Ю., Шилкин Д.А. Соединители и коммутационные устройства. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 151 с.
9. Физические величины. Справочник. Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Information about the paper in English

V.P. Antsupov, M.I. Yachikov, I.M. Yachikov
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia
E-mail: jachikov@mail.ru
Received 18.12.2020

REPROCESSING REMELT ELECTRODES IN ELECTROSLAG REMELTING FURNACES FROM USED CUTTING DISCS AND DETERMINING THE ANISOTROPY OF THE PROPERTIES

Abstract

The metallurgical industry is associated with much alloyed scrap. One of its varieties is wastes produced from used metal cutting discs. It is suggested to use the technology for their reprocessing, including the production of remelt electrodes from used shear blades of a single size and production of billets by remelting in the electroslag remelting furnace with an inner mold. To shape a cylindrical remelt electrode, discs are pressed to one another at 1 MPa or higher for a better thermal and electrical contact and welded together using argon or plasma arc welding. Electrodes manufactured according to such technology from used shear blades have the anisotropy of properties. The paper describes the method for calculating the effective heat conductivity factor and changes in specific electrical resistance in an axial direction of electrodes, factoring into heat and current transfer through a contact zone of two metal discs.

Keywords: metal cutting discs, electroslag remelting, alloyed steel, remelt electrode, anisotropy of properties, effective heat conductivity factor, contact pressure.
