

## ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА ШТАМПОВЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКЕ НЕПЛАВЯЩИМИСЯ ЭЛЕКТРОДАМИ

О.Г. КУЗЬМЕНКО

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Экспериментально и методом математического моделирования исследованы особенности процесса нагрева штамповых заготовок при электрошлаковой наплавке неплавящимися электродами. Установлено, что быстрый электрошлаковый нагрев заготовки под последующую наплавку при относительно невысоком расходе электроэнергии и теплонасыщении основного металла достигается при поддержании удельной мощности на уровне  $(150 \dots 180) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. При этом необходимо поддерживать на минимально возможном уровне напряжение наплавки и глубину шлаковой ванны. Библиогр. 11, рис. 8.

*Ключевые слова:* электрошлаковая наплавка, неплавящиеся электроды, удельная мощность, штампы, теплофизические процессы

Для получения качественного соединения слоев при электрошлаковой наплавке (ЭШН) жидким металлом и некомпактными материалами поверхность наплавляемого штампа должна быть нагрета до подплавления. При этом необходимо обеспечить равномерное подплавление наплавляемого штампа по высоте и по площади изношенной рабочей поверхности.

Из практики применения электрошлаковых технологий известно, что интенсивность теплового воздействия шлаковой ванны на основной металл зависит от значения тока и напряжения, а также от глубины шлаковой ванны [1–7]. При ведении электрошлакового процесса одним неплавящимся графитированным электродом на неизменной мощности уменьшение напряжения и глубины шлаковой ванны сопровождается увеличением температуры шлака под электродом и уменьшением ее в стороне от электрода на расстоянии более 30...60 мм [2, 4]. Влияние этих параметров на эффективность нагрева всей поверхности заготовки в работах [2, 4] не рассматривалось. Было необходимо исследовать влияние параметров режима ЭШН на следующие характеристики электрошлакового процесса:

продолжительность нагрева основного металла до оплавления его поверхности;

распределение температуры по высоте нагреваемой заготовки;

расход электроэнергии и возможности повышения эффективности ее использования.

Для исследования основных закономерностей электрошлакового нагрева твердого металла неплавящимися электродами провели несколько

серий экспериментов. Опыты проводили при использовании флюса АН-15М на натуральных образцах из стали 5ХНМ с замерами температур с помощью термопар, установленных на разных уровнях по высоте нагреваемой заготовки, и контролем состояния металла у поверхности с помощью стального прутка. Исследования на натуральных образцах широко сочетались с расчетами параметров нагрева по математической модели, описанной в работах [8, 9]. Результаты расчетов нагрева заготовки штампа высотой  $H = 400$  мм при удельной мощности тепловложения в шлаковую ванну  $q = 125 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> приведены на рис. 1.

С самого начала процесса и образования гарнисажа на поверхности холодного металла быстро устанавливается относительно постоянная температура шлаковой ванны  $t_{ш}$ . По мере возрастания температуры поверхности металла  $t_m$  уменьшается толщина гарнисажа  $\delta_r$  и увеличивается коэффициент теплопередачи  $k_{ш-м}$ , т.е. эффективность электрошлакового нагрева возрастает. Величина удельного теплового потока из шлаковой ванны в металл  $q_{ш-м}$  при этом изменяется незначительно —  $(21,5 \dots 26,9) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Непосредственно перед полным расплавлением гарнисажа коэффициент теплопередачи резко возрастает, также резко увеличивается тепловой поток в металл и ускоряется нагрев заготовки. После расплавления гарнисажа устанавливается квазиравновесие между температурами шлаковой ванны и металла, при котором происходит постепенный их рост и уменьшение удельного теплового потока  $q_{ш-м}$  от  $50 \cdot 10^4$  до  $25,8 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Экспериментально установлено, что с увеличением удельной мощности ЭШН сокращается вре-

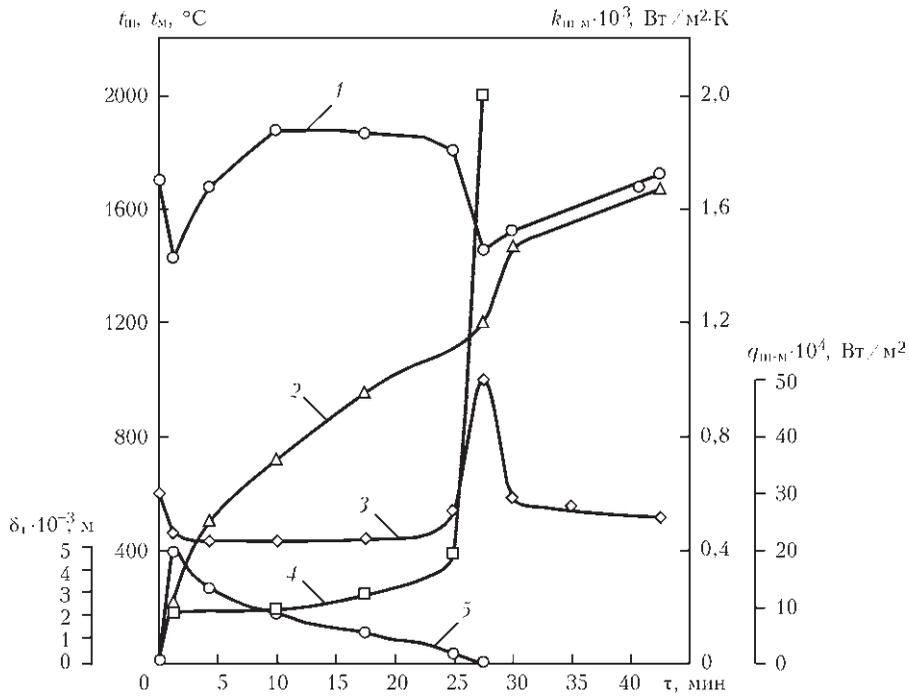


Рис. 1. Зависимость температуры шлаковой ванны  $t_{ш}$  (1) и поверхности наплавляемой заготовки  $t_{м}$  (2), удельного теплового потока  $q_{ш-м}$  (3) и коэффициента теплопередачи  $k_{ш-м}$  (4) к металлу, толщины гарнисажа  $\delta_r$  (5) от продолжительности  $\tau$  ЭШН

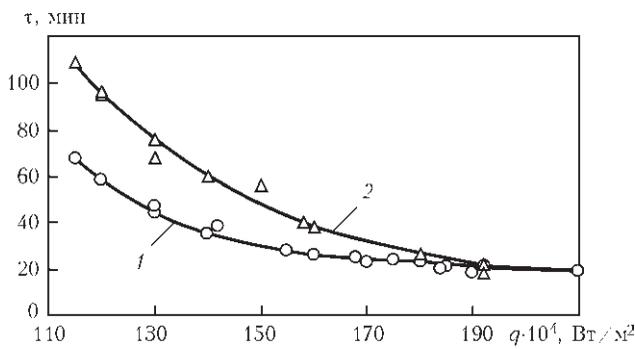


Рис. 2. Влияние удельной мощности ЭШН на продолжительность нагрева штамповых заготовок до подплавления: 1 — высотой 180 мм; 2 — высотой 400 мм

мя нагрева основного металла до подплавления его поверхности и увеличивается градиент температур по его высоте (рис. 2, 3).

Наиболее существенно влияние удельной мощности на эти характеристики проявляется при относительно низких ее значениях. В диапазоне высоких значений  $q$  это влияние незначительно (рис. 2, 3). Причина этого явления заключается в стабилизации температуры шлаковой ванны вследствие увеличения испарения летучих компонентов шлака и высокого теплоизлучения с поверхности шлаковой ванны. Влияние удельной мощности на длительность нагрева проявляется сильнее при наплавке заготовок большей высоты. При больших значениях удельной мощности ( $150 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и выше) заготовки разной высоты можно нагреть до подплавления примерно за одинаковое время (рис. 2).

Распределение температур по высоте заготовки толщиной 400 мм в зависимости от продолжи-

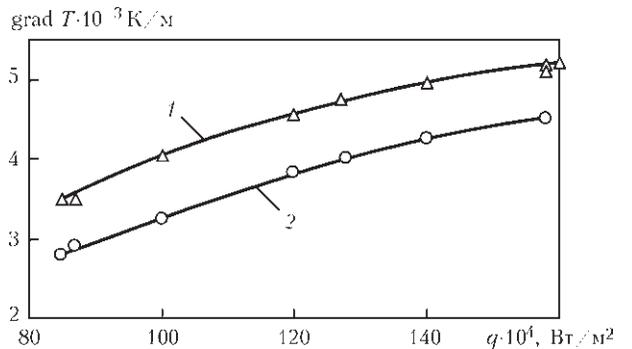


Рис. 3. Влияние удельной мощности ЭШН на градиент температур по высоте ( $H = 110$  мм) штамповой заготовки: 1 — в верхней половине заготовки; 2 — по всей высоте заготовки

тельности нагрева ее поверхности до подплавления ( $1510$  °С на поверхности) приведено на рис. 4.

Быстрый нагрев поверхности способствует уменьшению глубины и температуры прогрева металла. За один час заготовка на глубине 200 мм

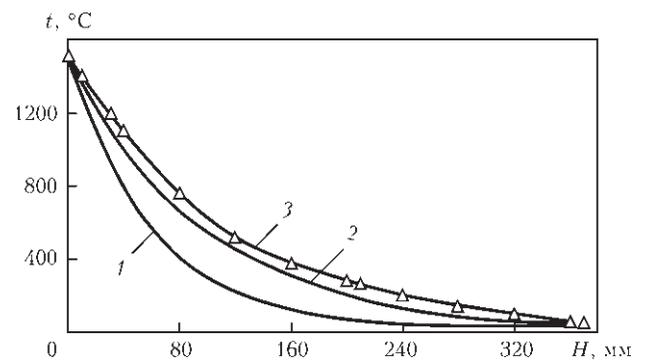


Рис. 4. Зависимость распределения температур по высоте заготовки штампа ( $H = 400$  мм) от времени нагрева, мин: 1 — 22; 2 — 58; 3 — 68 (1, 2 — расчетные данные; 3 — экспериментальные)

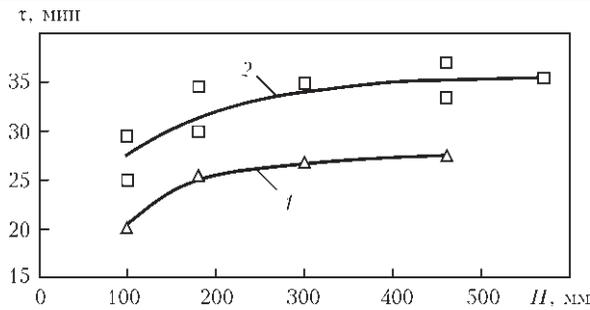


Рис. 5. Продолжительность нагрева штамповых заготовок различной высоты: 1 — до расплавления гарнисажа; 2 — до подплавления металла ( $q = (140...160) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>)

нагревается до 200 °С. Экспериментами также установлено, что продолжительность нагрева заготовок штампов высотой свыше 300 мм на удельной мощности ЭШН  $140 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и выше слабо зависит от ее высоты (рис. 5).

Применение высокой удельной мощности ЭШН приводит к тому, что интенсивно прогревается только верхняя часть заготовки и тепло не успевает распространиться в тело нагреваемого металла, благодаря чему упрощается задача нагрева штампов большой высоты.

Экспериментально оценивали влияние напряжения на эффективность электрошлакового процесса. Заготовку штампа нагревали на невысокой удельной мощности  $(60...65) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> до установления на поверхности равновесной температуры, выше которой металл не нагревается. После этого изменяли напряжение при сохранении неизменной удельной мощности и фиксировали температуру нагреваемого металла.

Как видно из рис. 6, с уменьшением напряжения достигаются более высокие температуры на поверхности заготовки, т.е. ее нагрев интенсифицируется.

Это объясняется приближением к поверхности металла зон активного тепловыделения [8], уменьшением теплотерь на излучение с зеркала шлаковой ванны и усилением перемешивания шлаковой ванны, что повышает значение коэффициента теплоотдачи [2, 10, 11].

Исследовали влияние глубины шлаковой ванны на интенсивность нагрева заготовки высоко-

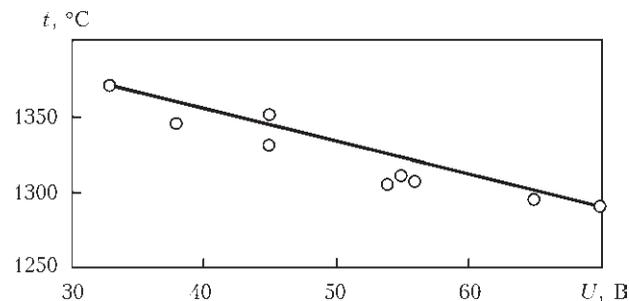


Рис. 6. Влияние напряжения электрошлакового процесса на температуру поверхности штампа ( $H = 300$  мм,  $q = (60...65) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>)

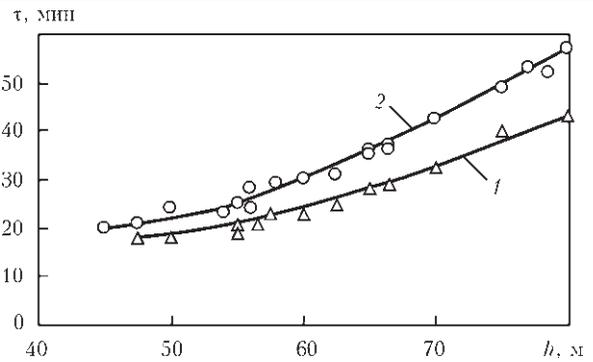


Рис. 7. Влияние глубины шлаковой ванны  $h_{ш}$  на продолжительность электрошлакового процесса: 1 — до расплавления гарнисажа; 2 — до подплавления металла ( $H = 300$  мм,  $q = (140...160) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>)

той 180 мм на удельной мощности  $150 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Фиксировали моменты расплавления гарнисажа и подплавления металла заготовки. Полученные результаты (рис. 7) свидетельствуют о сокращении продолжительности нагрева при уменьшении глубины шлаковой ванны.

Сокращение продолжительности нагрева при уменьшении глубины шлаковой ванны объясняется приближением зоны активного тепловыделения к поверхности металла и уменьшением теплового потока, поступающего в стенки водоохлаждаемого кристаллизатора. Однако при чрезмерном ее уменьшении ухудшается устойчивость электрошлакового процесса. Поэтому оптимальная глубина шлаковой ванны при ЭШН штамповой заготовки равна 50...60 мм.

Сокращение продолжительности нагрева приводит в общем случае к снижению расхода электроэнергии, в том числе при увеличении удельной мощности электрошлакового процесса (рис. 8).

Лишь в диапазоне больших удельных мощностей, когда, как было показано выше (см. рис. 2), продолжительность нагрева металла не зависит от этого показателя, расход энергии с увеличением удельной мощности возрастает.

При этом для нагрева более высокой заготовки в целом необходимо затратить больше элек-

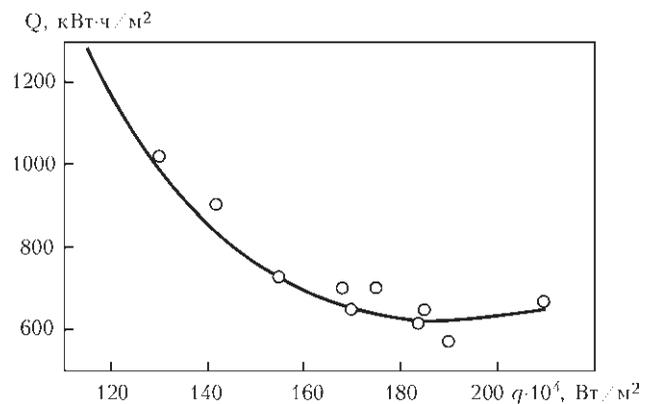


Рис. 8. Влияние удельной мощности ЭШН на расход электроэнергии  $Q$  при нагреве до подплавления штампов высотой 180 мм

троэнергии на  $1 \text{ м}^2$  поверхности. Таким образом, исследованиями установлено, что быстрый нагрев заготовки штампа до подплавления поверхности при относительно невысоких расходе электроэнергии и теплонасыщении основного металла достигается при поддержании удельной мощности ЭШН на уровне  $(150...180) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ . При этом необходимо поддерживать на минимально возможном уровне напряжение и глубину шлаковой ванны.

1. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.
2. *Лютый И.Ю., Латаш Ю.В.* Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов. – Киев: Наук. думка, 1982. – 188 с.
3. *Латаш Ю.В., Медовар Б.И.* Электрошлаковый переплав. – Киев: Наук. думка, 1965. – 80 с.
4. *Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве* / Б.И. Медовар, В.Л. Шевцов, Г.С. Маринский и др. – Киев: Наук. думка, 1978. – 301 с.
5. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 767 с.
6. *Носатов В.А.* Исследование и разработка технологии электрошлаковой отливки биметаллических штамповых заготовок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1982. – 16 с.
7. *Ксендзык Г.В.* Некоторые закономерности проплавления основного металла при кольцевой электрошлаковой наплавке // Высокопроизводительные процессы наплавки и наплавочные материалы: Материалы Всесоюзн. совещ. – г. Коммунарск, сент. 1973. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1973. – С. 26–33.
8. *Тарасевич Н.И.* Формирование слитков и отливок при регулируемом теплофизическом воздействии: Автореф. дис. ... д-р техн. наук. – Киев: ФТИМС, 1997. – 42 с.
9. *Демченко В.Ф.* Вычислительный эксперимент в теплофизике технологических процессов сварки и спецэлектротехнологии: Автореф. дис. ... д-р техн. наук. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1992. – 33 с.
10. *Баскаков А.П.* Скоростной безокислительный нагрев и термическая обработка в кипящем слое. – М.: Металлургия, 1968. – 126 с.
11. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.

Поступила в редакцию 20.04.2015

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины



НИИ лазерной техники и технологии НТУУ «КПИ»



Исследовательский центр лазерных процессов и технологий  
Дзеньянского технологического университета



Международная Ассоциация «Сварка»

## VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

г. Одесса, Украина, отель «Курортный»

14-18 сентября 2015 г.



### Тематика конференции

- Лазерная сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Выращивание трехмерных объектов
- Гибридные технологии

<http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2015>