



ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭШН НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЗУБЬЕВ ШЕСТЕРЕН

С. М. КОЗУЛИН, инж., **И. И. СУЩУК-СЛЮСАРЕНКО**, И. И. ЛЫЧКО, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние параметров режима электрошлаковой наплавки на глубину проплавления и толщину гарнисажной корочки при восстановлении зубьев крупномодульных шестерен электрошлаковой наплавкой. По полученным регрессионным зависимостям построены номограммы для определения количественной взаимосвязи отдельных параметров режима.

Ключевые слова: крупномодульные шестерни, восстановление, электрошлаковая наплавка, параметры режима, гарнисажная корочка, глубина проплавления

Качество и работоспособность зубьев крупномодульных шестерен, восстановленных с применением электрошлаковой наплавки (ЭШН), зависит от ряда факторов, связанных с технологией и техникой выполнения наплавки.

Основными показателями качества восстановленных зубьев являются надежность сплавления присадочного металла с основным, получение заданных геометрических размеров профиля восстанавливаемого зуба, высокие механические свойства наплавленного металла и зоны термического влияния, а также качество формирования рабочей поверхности наплавленного зуба. Наиболее важным фактором, обеспечивающим указанные выше требования, является оптимальный режим, который можно выбрать, если известна качественная и количественная взаимосвязь между его параметрами.

Учитывая сложную конфигурацию и геометрические размеры эвольвентных профилей восстанавливаемых зубьев, а также специфические условия их работы для выбора оптимального режима наплавки необходимо достаточно точно знать взаимосвязь между параметрами режима ЭШН и их влияние на качество восстанавливаемого зуба. При этом особое значение приобретает обеспечение гарантированного сплавления в переходных галтелях наплавленного зуба, а также получение гарнисажной корочки равномерной и прогнозируемой толщины по периметру профиля зуба и его длине.

Для нахождения указанных выше зависимостей выполнили экспериментальные исследования на натуральных образцах. Перед этим экспериментальным путем изучали влияние параметров режима, рода тока, а также техники выполнения наплавки на устойчивость электрошлакового процес-

са [1]. Установлено, что при наплавке на постоянном токе обратной полярности обеспечивается достаточная устойчивость процесса и удовлетворительное формирование наплавленного металла.

В настоящей работе исследуется влияние параметров режима на глубину проплавления и толщину гарнисажной корочки при восстановлении изношенных зубьев ЭШН плавящимся мундштуком. Исследования выполняли с применением методики планирования эксперимента [2].

Анализ полученных результатов экспериментов показал, что при ЭШН зубьев плавящимся мундштуком наиболее значимыми параметрами режима являются скорость наплавки v_n как обобщенный показатель, напряжение на шлаковой ванне U , глубина шлаковой ванны $h_{ш}$, расстояние от электродной проволоки до наплаваемой кромки l , марка флюса Φ и род тока P . Указанные параметры выбраны в качестве факторов для проведения опытов в соответствии с методикой планирования эксперимента и определения регрессионных зависимостей:

$$\delta_r = f(v_n, U, h_{ш}, l, \Phi, P) \text{ [мм];}$$

$$h_{пр} = f(v_n, U, h_{ш}, l, \Phi, P) \text{ [мм],}$$

где δ_r — толщина гарнисажной корочки; $h_{пр}$ — глубина проплавления.

Неиспользованные параметры режима приняты постоянными по оптимальным значениям либо учтены через выбранные факторы, например, скорость подачи электродной проволоки $v_э$ и сварочный ток учтены через скорость наплавки v_n .

Для уменьшения количества опытов использовали методику построения дробного факторного эксперимента, применив 1/8 реплику типа 2^{6-3} от полного факторного эксперимента 2^6 [2].

Уровни факторов назначали в реально воспроизводимых режимах наплавки. Параметры режима варьировали в следующем диапазоне: $v_n = 0,6...1$ м/ч; $U = 46...52$ В; $h_{ш} = 45...55$ мм; $l =$



= 20...30 мм. Опыты выполняли на переменном и постоянном токе обратной полярности с использованием плавящихся флюсов АН-8 и АН-9У.

Для выполнения экспериментальных исследований разработана и изготовлена лабораторная установка (рис. 1), включающая рабочий стол для закрепления восстанавливаемой шестерни, узел подвески и перемещения кристаллизатора, устройство крепления входного кармана на изделии и др. ЭШН выполняли с помощью серийного аппарата А-535. Для электропитания установки использовали трансформатор ТШС-3000-3 и выпрямитель ВСЖ-1602.

Опыты проводили на натуральных образцах изношенных подвенцовых шестерен цементной мельницы (модуль зубьев — 27, их количество — 22, диаметр шестерни — 420 мм, материал — сталь 40Х). Перед наплавкой изношенные зубья срезали анодно-механическим способом, оставляя часть ножки зуба, высота которой составляла 0,25 модуля зуба.

Пластины плавящегося мундштука (рис. 2) изготавливали из стали Ст3, а каналами для подачи присадочной проволоки служили плотно навитые спирали из сварочной проволоки марки Св-08ГА диаметром 3 мм.

В качестве формирующей оснастки использовали водоохлаждаемый кристаллизатор, изготовленный из цельной медной заготовки. Для охлаждения его водой в заготовке просверливали продольные каналы. Режим охлаждения кристаллизатора контролировали с помощью метода мерной емкости [3]. Температуру воды в кристаллизаторе на входе и выходе измеряли ртутным термометром (точность измерения $\pm 0,5$ °С). В ходе выполнения всех опытов постоянно поддерживали следующий режим охлаждения: расход воды — 14...16 л/мин; разность температур на входе и выходе — 10...12 °С.

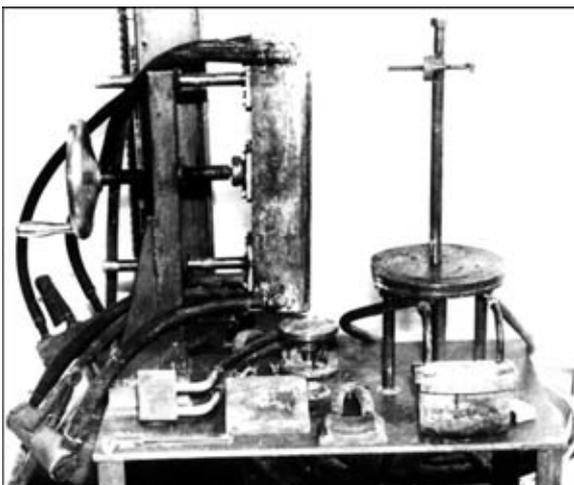


Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки для ЭШН зубьев плавящимся мундштуком

Опытную ЭШН выполняли на переменном и постоянном токе обратной полярности. При этом применяли сварочную проволоку Св-18ХМА и плавящиеся флюсы АН-8 и АН-9У, широко используемые при электрошлаковой сварке углеродистых и легированных сталей. Флюс АН-9У имеет пониженное содержание SiO_2 , что способствует повышению температуры начала кипения флюса [4] и улучшению устойчивости процесса ЭШН. Последнее приобретает особое значение при ведении процесса в водоохлаждаемом кристаллизаторе, а также при выполнении ЭШН профилей с небольшим поперечным сечением. Хорошие металлургические свойства флюса АН-9У обеспечивают высокое качество металла шва, выполненного на легированных сталях повышенной прочности [4], что очень важно при восстановлении зубьев крупномодульных шестерен. Более низкая по сравнению с флюсом АН-8 вязкость, достигаемая за счет увеличения содержания в нем CaF_2 , позволяет получать на водоохлаждаемых рабочих поверхностях кристаллизатора более тонкую гарнисажную корочку, необходимую для получения высокой точности восстановления профилей зубьев.

Электрические параметры режима фиксировали на диаграммной ленте с помощью самопишущих приборов Н-392 и Н-390.

Средние значения толщины гарнисажной корочки δ_r находили как среднее арифметическое шести замеров толщины кусочков гарнисажа, взятых на различных участках наплавленной поверхности зуба (рис. 2). Замеры выполняли с помощью микрометра (погрешность составляла $\pm 0,01$ мм).

Средние значения глубины проплавления $h_{пр}$ основного металла определяли следующим способом. После удаления изношенных зубьев выполняли замеры высоты срезанных частей зубьев h_c (рис. 2). После наплавки зубьев из тела шестерни вырезали поперечные темплеты через каж-

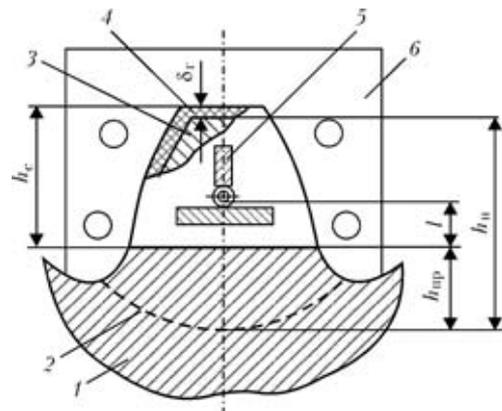


Рис. 2. Схема замеров толщины гарнисажной корочки δ_r , расстояния от электрода до наплавляемой кромки l и глубины проплавления $h_{пр}$: 1 — восстанавливаемая шестерня; 2 — зона сплавления; 3 — наплавленный металл; 4 — гарнисажная корочка; 5 — плавящийся мундштук; 6 — кристаллизатор; остальные обозначения см. в тексте

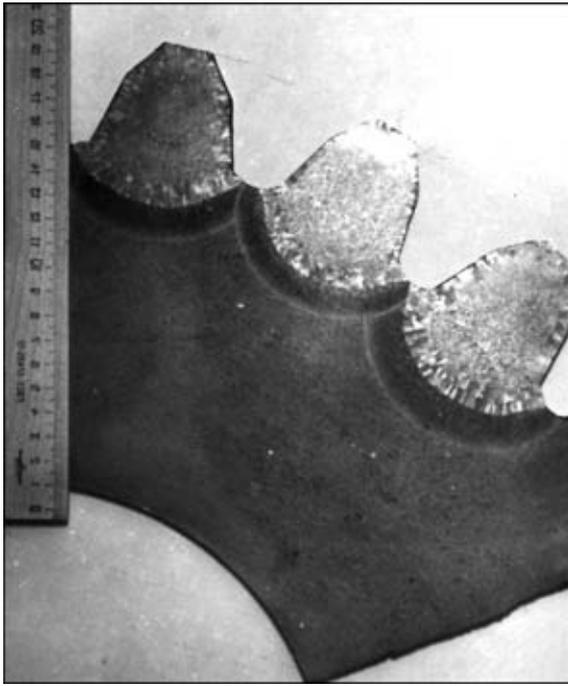


Рис. 3. Поперечный макрошлиф наплавленных зубьев

дые 70 мм по длине зубьев. Из темплетов изготовили поперечные макрошлифы (рис. 3) и по очертанию границы (зоны) сплавления измеряли высоту наплавленного металла h_n (см. рис. 2). Значения глубины проплавления $h_{пр}$ находили из выражения

$$h_{пр} = h_n + \delta_r - h_c \text{ [мм]}.$$

После обработки экспериментальных данных и оценки статистической значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [2] для доверительной вероятности 0,95 и числа степеней свободы 16 получили следующие уравнения регрессии:

$$\delta_r = 0,275v_n - 0,0275U - 0,26\Phi + 2,0755; \quad (1)$$

$$h_{пр} = 0,813U - 7,815v_n - 0,1126l + 0,5625P - 3,817. \quad (2)$$

Отсутствие в выражениях (1) и (2) параметра $h_{ш}$ объясняется тем, что влияние глубины шлаковой ванны на толщину гарнисажной корочки δ_r и глубину проплавления $h_{пр}$ оказалось статистически незначимым в принятом интервале варьирования.

Проверка по критерию Фишера показала, что параметры модели не противоречат гипотезе адекватности для доверительной вероятности 0,95. Среднеквадратические ошибки при вычислении коэффициентов регрессии по (1) и (2) составили соответственно 0,00036 и 0,05859, что вполне допустимо при определении указанных выше параметров при ЭШН.

По выражениям (1) и (2) построены номограммы для определения толщины гарнисажной ко-

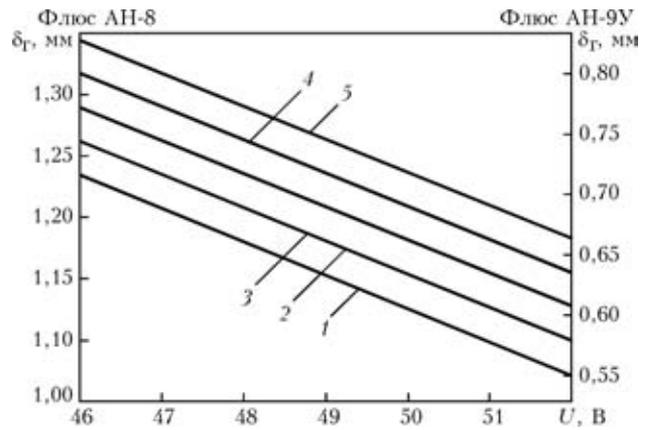


Рис. 4. Номограмма определения толщины гарнисажной корочки δ_r в зависимости от напряжения на шлаковой ванне U , скорости наплавки v_n и марки флюса: 1 — $v_n = 0,6$; 2 — 0,7; 3 — 0,8; 4 — 0,9; 5 — 1,0 м/ч

рочки в зависимости от напряжения на шлаковой ванне, скорости наплавки и марки флюса (рис. 4), а также максимальной глубины проплавления в зависимости от напряжения на шлаковой ванне, скорости наплавки, расстояния от электрода до наплавляемой кромки и рода тока (рис. 5).

Из рис. 4 видно, что с увеличением напряжения на шлаковой ванне U толщина гарнисажной корочки уменьшается, а с возрастанием скорости наплавки v_n — увеличивается. Это можно объяснить тем, что, как известно, толщина гарнисажной корочки, формирующейся на стенке кристаллизатора, определяется режимом ЭШН, т. е. условиями подвода тепла от шлаковой ванны к гарнисажной корочке и теплоотвода в систему охлаждения кристаллизатора [3, 4]. При этом поверхность гар-

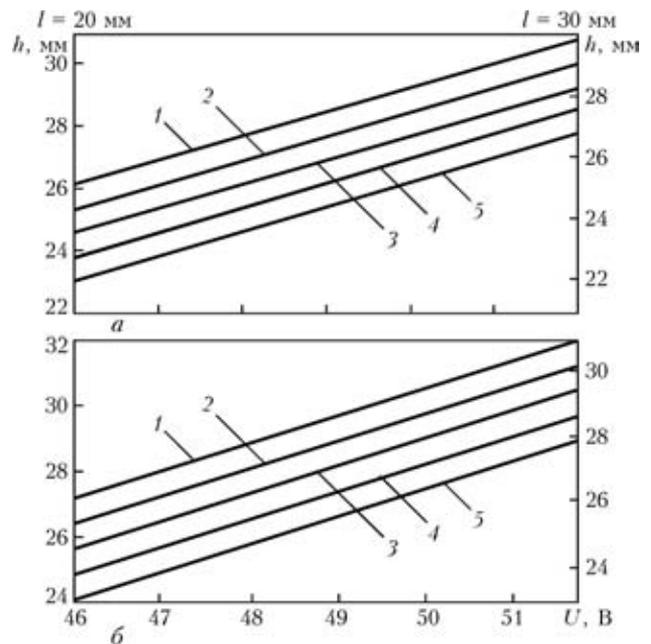


Рис. 5. Номограммы определения глубины проплавления $h_{пр}$ в зависимости от напряжения на шлаковой ванне U , скорости наплавки v_n , расстояния от электрода до наплавляемой кромки l и рода тока, полученные при переменном (а) и постоянном (б) токе: 1–5 — см. рис. 4



нисажной корочки со стороны шлаковой ванны играет роль подвижной фазовой границы. В квазистационарном режиме подвод тепла от расплавленного шлака к фазовой границе равен теплоотводу от нее к охлаждающей воде. При увеличении напряжения тепловой поток, подводимый к стенке кристаллизатора, увеличивается, т. е. к фазовой границе подводится больше тепла, чем отводится. Вследствие того, что температура фазовой границы измениться не может [4], происходит подплавление гарнисажной корочки, что приводит к снижению его термического сопротивления и увеличению отводимого тепла. После этого наступает равновесие между подводимым и отводимым теплом, но уже при более тонкой гарнисажной корочке.

С увеличением скорости наплавки удельная погонная энергия процесса ЭШН уменьшается, снижается тепловой поток к водоохлаждаемой стенке кристаллизатора, нарушается тепловой баланс, который устанавливается при более толстой гарнисажной корочке. Установлено, что с увеличением напряжения на шлаковой ванне толщина гарнисажной корочки уменьшается по линейной зависимости, а с возрастанием скорости наплавки — увеличивается также практически по линейной зависимости (см. рис. 4). При использовании флюса АН-8 толщина гарнисажной корочки, полученной на тех же режимах наплавки, почти на 40 % больше, чем в случае флюса АН-9У.

Из рис. 5 следует, что с увеличением напряжения на шлаковой ванне, уменьшением скорости наплавки и расстояния от электрода до наплавляемой кромки глубина проплавления увеличивается. При этом наибольшее влияние на нее оказывает U . Удаление электрода от наплавляемой кромки в пределах заданного интервала варьирования (10 мм) изменяет глубину проплавления основного металла не более чем на 4 %. При ЭШН

на постоянном токе обратной полярности глубина проплавления в среднем на 4,3 % больше, чем на переменном токе при аналогичных режимах наплавки.

Сравнение расчетных данных с результатами экспериментов по ЭШН зубьев модулей 22...32 показало удовлетворительную их сходимость. Погрешность не превышала 10 %, что вполне приемлемо для инженерных расчетов.

Выводы

1. При выполнении ЭШН на постоянном токе значительно улучшается качество формирования наплавленного металла, увеличиваются диапазон допустимых колебаний параметров режима и глубина проплавления.

2. Установленные зависимости позволяют при проектировании формирующей оснастки достаточно точно прогнозировать геометрические параметры эвольвентного профиля восстанавливаемого зуба, что дает возможность в отдельных случаях не осуществлять механическую обработку рабочих поверхностей зубьев после их наплавки.

3. При восстановлении зубьев крупномодульных шестерен способом ЭШН предпочтительнее использовать флюс АН-9У.

4. Установленные количественные зависимости параметров режима наплавки приемлемы для выполнения расчетов оптимальных режимов ЭШН зубьев модулей 22...32.

1. Козулин С. М., Лычко Иг. И. Электрошлаковая наплавка зубьев крупномодульных шестерен // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 62–64.
2. Спиридонов А. А., Васильев Н. Г. Планирование эксперимента. — Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1975. — 154 с.
3. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве / Под ред. Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1978. — 304 с.
4. Электрошлаковая сварка и наплавка / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 640 с.

The influence of the parameters of electroslag cladding on the penetration depth and thickness of skull crust was studied at reconditioning of the teeth of large-pitch gears by electroslag cladding. The obtained regression dependencies were used to plot the nomograms for establishing a quantitative relationship between the individual parameters of the mode.

Поступила в редакцию 24.02.2006