

## ТЕХНОЛОГИЯ ШИРОКОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

А. П. ЖУДРА, С. Ю. КРИВЧИКОВ, кандидаты техн. наук, В. В. ПЕТРОВ, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния параметров режима широкослойной наплавки на характеристики наплавленного слоя, а также определены оптимальные диапазоны изменения параметров режима при наплавке поверхностей цилиндрических деталей диаметром 180...300 мм. Показано применение результатов исследования при разработке технологии восстановления крупногабаритных коленчатых валов дизель-генераторов.

*Ключевые слова:* широкослойная дуговая наплавка, крупногабаритные коленчатые валы, самозащитная порошковая проволока, оптимизация режимов наплавки, технология наплавки

Крупногабаритные коленчатые валы (коленчатые валы компрессоров магистрального транспортирования газа, дизель-генераторов, судовых и тепловозных двигателей и др.) являются металлоемкими изделиями, масса которых достигает 6 т при длине около 6 м. Средняя цена одного такого коленчатого вала составляет 70 тыс. дол. США. Конструктивно он представляет собой кривошип из среднеуглеродистой стали, состоящий из двух групп цилиндрических шеек — шатунной и коренной. Шатунная группа включает до восьми шеек, а коренная — до десяти, диаметр которых составляет 180...280 мм.

Основными параметрами нагрузок, определяющих рабочий ресурс коленчатого вала, являются высокое контактное давление в трущихся сопряжениях шейка-вкладыш и количество циклов знакопеременных нагрузений. Они приводят к изнашиванию рабочих поверхностей и уменьшению номинального диаметра коренных и шатунных шеек. Изменение геометрических размеров трущихся сопряжений в свою очередь ведет к возникновению аварийной ситуации: нарушению режима смазывания трущихся сопряжений, созданию условий для «сухого» трения, «схватыванию» и выплавлению сопряженных с шейками вкладышей. Таким образом, коленчатый вал, израсходовавший около 30 % своего конструктивного запаса прочности, выходит из строя по причине значительного износа, который в зависимости от условий и длительности эксплуатации может составлять 1,5...2,5 мм.

Для восстановления цилиндрических деталей большого диаметра со значительным износом (более 5 мм) широко применяется наплавка по винтовой линии под флюсом или открытой дугой.

При износе менее 3 мм более целесообразно применять широкослойную наплавку самозащитной порошковой проволокой, производительность которой в 1,8...2,0 раза выше, чем у наплавки по винтовой линии. Кроме того, широкослойная наплавка характеризуется благоприятным термическим циклом (наличием автоподогрева наплаваемой детали)\*, что очень важно для увеличения трещиностойкости при наплавке закаливающих сталей.

На рис. 1 представлена схема широкослойной наплавки цилиндрической поверхности самозащитной порошковой проволокой. При наплавке вращение детали диаметром  $D$  происходит со скоростью наплавки  $v_n$ , а порошковая проволока (электрод) подается в зону плавления со скоростью подачи  $v_{п.пр}$  и одновременно совершает возвратно-поступательные перемещения (колебания) на ширину  $B$  наплаваемой поверхности (амплитуда или размах колебаний) с заданными радиусом  $r$  и скоростью колебаний  $v_k$ . В процессе наплавки и постепенной кристаллизации сварочной ванны на поверхности наплаваемой детали формируется наплавленный слой. Длительность цикла наплавки  $t_n$  соответствует времени одного оборота наплаваемой детали. Очевидно, что параметры широкослойной наплавки оказывают влияние на толщину наплавленного слоя  $\delta$  и качество его формирования. При этом большое количество переменных параметров режима широкослойной наплавки, а также возможность их варьирования в широких диапазонах значений часто затрудняют оптимизацию этого процесса.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния отдельных параметров режима широкослойной наплавки на характеристики наплавленного слоя, а также определение оптимальных диапазонов их изменения

\* Кривчиков С. Ю., Жудра А. П., Петров В. В. О термическом цикле при широкослойной наплавке цилиндрических деталей из чугуна // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 49–50.

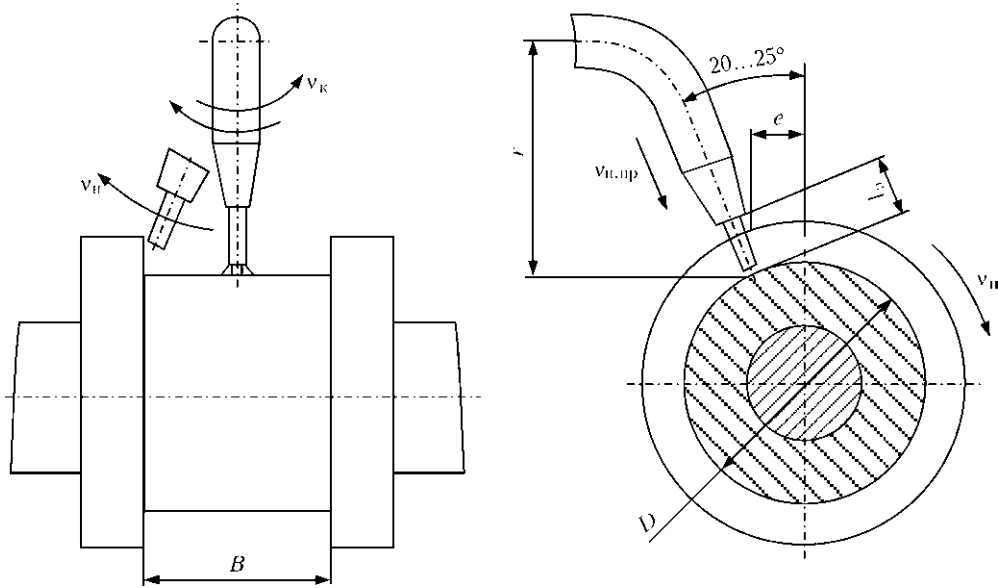


Рис. 1. Схема техники широкослойной наплавки колеблющимся электродом (самозащитной порошковой проволокой) цилиндрических деталей (см. обозначения в тексте)

при наплавке поверхностей цилиндрических деталей диаметром 180...300 мм.

Опытные наплавки выполняли на постоянном токе обратной полярности на образцы из стали Ст3, геометрические размеры которых соответствовали размерам коренных и шатунных шеек крупногабаритных коленчатых валов. В качестве электродного материала использовали самозащитную порошковую проволоку ПП-Нп-30Х4Г2СМ диаметром 2 мм, которая хорошо зарекомендовала себя при наплавке стальных коленчатых валов.

Средняя толщина  $\delta$  наплавленного слоя и качество его формирования являются основными исходными характеристиками, на основании ко-

торых производится выбор таких параметров режима широкослойной наплавки, как  $I_H$ ,  $U_d$ ,  $v_H$ ,  $v_{п.пр}$ ,  $v_k$ , вылета электрода  $l_3$  и смещения его с зенита  $e$ . Для задания значения  $\delta$  (с учетом припуска на механическую обработку) можно воспользоваться формулой

$$\delta = (1,0 \dots 1,2)(И + 0,5П),$$

где  $И$  — износ или толщина наплавленного слоя, мм;  $П$  — припуск на диаметр для механической обработки, мм;  $1,0 \dots 1,2$  — коэффициент, который учитывает степень шероховатости поверхности наплавленного слоя. Как отмечалось выше, для крупногабаритных коленчатых валов  $И = 1,5 \dots 3,0$  мм. Широкослойная наплавка слоя металла такой толщины на цилиндрическую поверхность большого диаметра возможна в широком диапазоне токов. Однако для используемой порошковой проволоки технологически эффективный диапазон тока наплавки и напряжения составляет соответственно  $I_H = 200 \dots 400$  А и  $U_d = 26 \dots 28$  В при  $l_3 = 20 \dots 25$  мм. Необходимо отметить, что для таких значений тока наплавки максимальная ширина наплавленного слоя с позиции обеспечения приемлемого качества его формирования и производительности процесса не должна превышать 70 мм. Установлено также, что при широкослойной наплавке среднелегированной порошковой проволокой диаметром 2 мм абсолютные значения  $I_H$  (А) и  $v_{п.пр}$  (м/ч) практически равны между собой (рис. 2). Это позволяет использовать параметр  $v_{п.пр}$  в качестве более общей характеристики процесса, исключив из числа параметров оптимизации режима ток наплавки.

Шероховатость поверхности наплавленного слоя, имеющая место при широкослойной наплавке, оценивали коэффициентом вариации дейс-

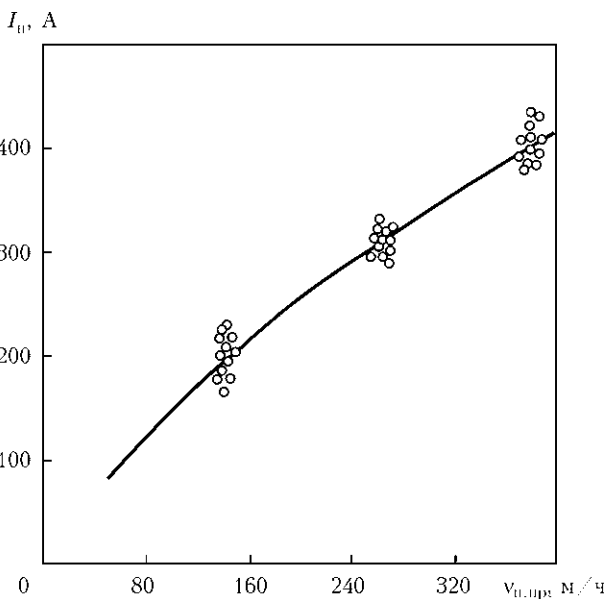


Рис.2. Зависимость тока  $I_H$  от скорости подачи порошковой проволоки  $v_{п.пр}$  ПП-Нп-30Х4Г2СМ диаметром 2 мм при широкослойной наплавке ( $U_d = 26 \dots 28$  В;  $l_3 = 20 \dots 25$  мм;  $v_k = 155 \dots 215$  м/ч)

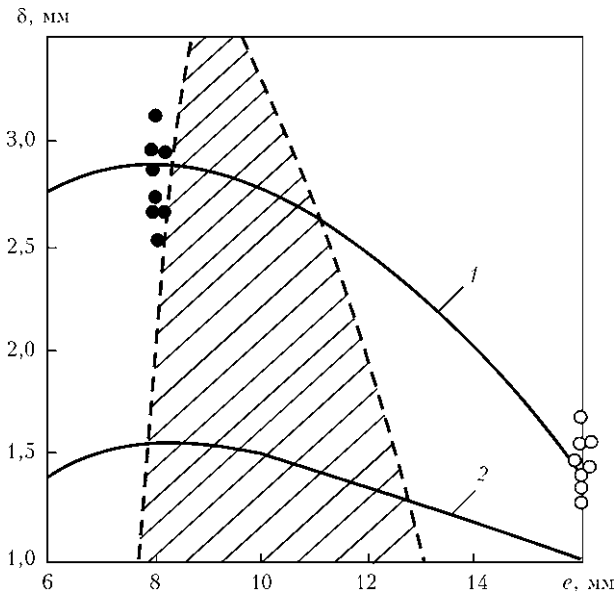


Рис. 3. Зависимость средней толщины наплавленного слоя  $\delta$  от смещения электрода с зенита  $e$  при  $v_n = 5,5$  м/ч,  $CV_\delta = 30\%$  и  $I_n = 400$  (1); 200 А (2): ●, ○ — стекание жидкого металла соответственно вперед и назад

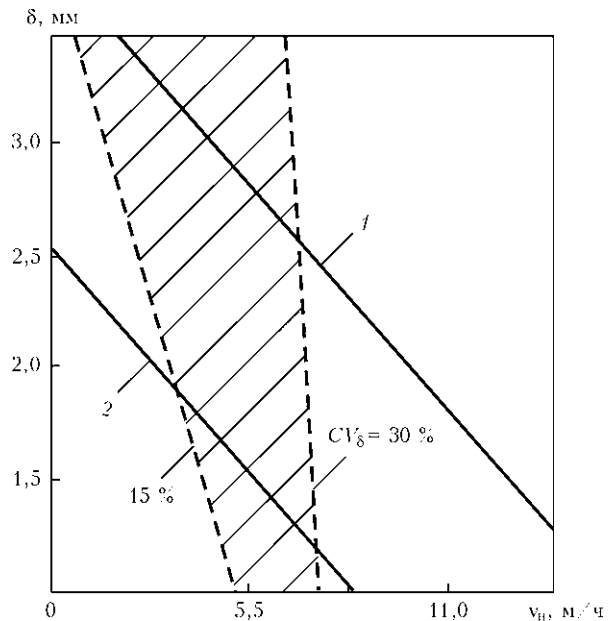


Рис. 4. Зависимость средней толщины  $\delta$  наплавленного слоя от скорости наплавки  $v_n$  при  $l_3 = 8$  мм: 1, 2 — см. на рис. 3

твительной толщины слоя  $CV_\delta$ . Максимальное значение  $CV_\delta = 30\%$  принимали с учетом величины припуска на последующую механическую обработку наплавленной поверхности. Установлено, что диапазону рассеивания действительной толщины слоя 15...30% соответствует скорость наплавки 3...8 м/ч. При этом смещение электрода с зенита, обеспечивающее хорошее формирование наплавленного слоя, также изменяется в довольно узком интервале значений. Так, при скорости наплавки 5,5 м/ч и токе 200...400 А оптимальное качество формирования наплавленного слоя имеет место при смещении электрода с зенита в пределах 8...12 мм (заштрихованная область на рис. 3). За пределами этого диапазона формирование наплавленного слоя нарушается и возникает опасность стекания части жидкой сварочной ванны с наплаваемой поверхности. Следует учитывать, что, чем больше  $v_n$  и  $I_n$ , тем больше должно быть значение  $e$ . Влияние значений  $v_n$  и  $I_n$  на среднюю толщину наплавленного слоя показано на рис. 4.

Скорость колебаний электрода  $v_k$  оказывает влияние на процесс формирования сварочной ванны, протяженность которой при широкослойной наплавке примерно равна его амплитуде (или размаху) колебаний. При малом значении  $v_k$  образуются отдельные поперечные валики наплавленного металла, а если ее значение слишком велико, то появляются участки несплавления основного и наплавленного металлов, ухудшаются стабильность горения дуги и равномерность плавления порошковой проволоки. И в первом, и во втором случае качество формирования наплавленного слоя бывает неудовлетворительным. В связи с

этим оптимальным, с точки зрения обеспечения хорошего качества формирования, является такое значение  $v_k$ , при котором в начале процесса наплавки образуется общая жидкая сварочная ванна, по длине равная размаху колебаний электрода. Экспериментально установлено, что при наплавке слоев шириной 40...70 мм и  $I_n = 200...400$  А оптимальное значение  $v_k$  может изменяться в пределах 120...250 м/ч, при этом оно зависит от тока и ширины наплавленного слоя. Следует отметить, что скорость колебаний оказывает существенное влияние лишь на время образования общей сварочной ванны в начале процесса наплавки, после ее образования значение  $v_k$  можно изменять в широком диапазоне без ущерба качеству формирования наплавленного слоя.

Однако регулировка параметра  $v_k$  занимает много времени. Для исключения этой операции достаточно определить время, необходимое для образования общей сварочной ванны, и использовать его в качестве постоянного параметра режима наплавки. Установлено, что в исследованных диапазонах тока (200...400 А) и ширины наплавленного слоя (30...70 мм) это время составляет 2...3 с, что соответствует частоте колебаний электрода  $n_k = 60$  мин<sup>-1</sup>. Установленная частота колебаний обеспечивает хорошее качество формирования наплавленного слоя, поэтому ее можно использовать в качестве универсальной. При этом следует учитывать, что в течение времени задержки начала процесса наплавки (2...3 с) скорость наплавки должна быть равна нулю, после истечения этого времени  $v_n$  возрастает до заданного значения. Использование параметра  $n_k$  вместо  $v_k$  позволило также существенно упростить механизм колебания электрода.



Одним из требований, предъявляемых к технологии широкослойной наплавки шеек коленчатых валов, является обязательная наплавка галтелей — участков перехода цилиндрической поверхности шейки к перпендикулярно расположенной поверхности щек. Экспериментальным путем установлено, что если электрод в процессе наплавки совершает колебательные движения с постоянной скоростью, то в моменты его пребывания у галтелей (в крайних положениях) тепла дуги и электродного металла оказывается недостаточным для их надежного заплавления. В результате образуется дефект в виде участка несплавления наплавленного слоя с пригалтельным участком щеки шейки коленчатого вала. Для устранения этого недостатка в параметры режима широкослойной наплавки необходимо ввести еще одну характеристику, а именно, время остановки электрода в крайних положениях. В зависимости от  $\tau$  изменяется и качество наплавленных пригалтельных участков: чем больше время задержки и меньше скорость наплавки, тем выше качество формирования наплавленного металла. При прочих равных условиях  $\tau$  зависит также от условий теплоотвода: чем больше масса прилегающих к шейке щек, тем больше значение  $\tau$ . Характер колебательного движения электрода задается профилированным кулачком, который кинематически связан с мундштуком для подачи порошковой проволоки. При этом профиль кулачка задается таким образом, что полный цикл колебательного движения электрода состоит из трех участков: 1-й и 2-й участки — остановка электрода у галтелей в течение времени  $\tau$ ; 3-й — движение электрода с заданной постоянной скоростью. Для исследованных диапазонов режимов широкослойной наплавки максимальное значение  $\tau$  не превышает 0,26 с.

Включение в число параметров оптимизации радиуса  $r$  колебаний электрода обусловлено тем, что поверхность галтельных участков удобнее наплавлять при криволинейной траектории движения конца электрода. В результате устраняется возможность возникновения коротких замыканий между мундштуком и щеками. Согласно расчетам, изменение вылета электрода при его колебаниях на ширину 30...70 мм составляет 0,6...4,8 мм. Однако, как показали эксперименты, такое изменение вылета при скорости подачи порошковой проволоки более 180 м/ч не оказывает заметного влияния на длину дуги, ее электрические параметры и качество формирования наплавленного слоя. Изменение радиуса колебаний существенно влияет на процесс наплавки галтельных участков и потери электродного металла. Из полученных данных следует, что с увеличением значений  $r$  в пределах 81...145 мм качество формирования метал-

ла, наплавленного на галтельные участки, ухудшается, а потери электродного металла возрастают с 8,1 до 15,8 %. Это связано с уменьшением угла наклона электрода к плоскости щеки наплавленной шейки, что в свою очередь приводит к случайным касаниям щеки и боковой поверхности оболочки порошковой проволоки, возникновению шунтирующих дугу коротких замыканий и разбрызгиванию электродного металла. Таким образом, при наплавке слоев шириной не более 70 мм оптимальное значение  $r$  должно составлять 80...90 мм.

Проведенные исследования легли в основу разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона технологии наплавки крупногабаритных коленчатых валов дизель-генераторов. Технология включает три последовательно выполняемых этапа: подготовку коленчатого вала; широкослойную наплавку коренных и шатунных шеек; механическую обработку наплавленного коленчатого вала. Если после наплавки или в процессе механической обработки обнаруживаются дефекты наплавленного слоя (например, участки с крупными порами или раковинами и т. п.), то технологией наплавки дополнительно предусмотрен способ их устранения.

Подготовка коленчатого вала к наплавке включает дефектоскопию подлежащих наплавке поверхностей вала с целью обнаружения трещин. При наличии трещин, выходящих на поверхность шеек и имеющих протяженность более 20 мм, их подвергают механической разделке и заварке.

Оборудование для наплавки коленчатых валов включает вращатель и наплавочный аппарат (например, наплавочная головка А-580), оснащенный механизмом колебаний электрода. В качестве вращателя использован специализированный токарно-винторезный станок, предназначенный для механической обработки заготовок коленчатых валов дизель-генераторов. Широкослойную наплавку выполняют самозащитной порошковой проволокой диаметром 2 мм с использованием предварительного подогрева наплавленной шейки до температуры 220...240 °С. Оптимальные режимы наплавки приведены в таблице.

При широкослойной наплавке открытой дугой с использованием порошковой проволоки ПП-Нп-30Х4Г2СМ наплавленный металл имеет следующий химический состав, мас. %: 0,3 С; 4,0 Сr; 2 Мn; 0,8 Si; 0,8 Mo; 0,45 Ti.

На рис. 5, а представлен внешний вид наплавленной шейки коленчатого вала шириной 65 мм. Ширина шейки вала дизель-генератора составляет 135 мм, что существенно превышает допустимо возможную ширину наплавленного слоя при указанной марке порошковой проволоки. Поэтому процесс наплавки шейки состоит из двух этапов: сначала выполняют широкослойную наплавку одной части шейки с размахом колебаний

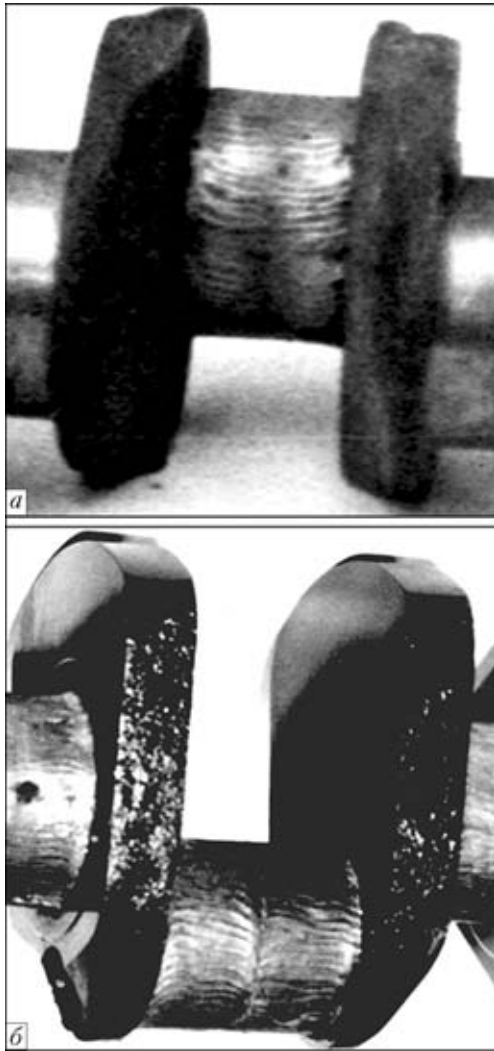


Рис. 5. Внешний вид шеек коленчатого вала после широко-слойной наплавки самозащитной порошковой проволокой ПП-Нп-30Х4Г2СМ на оптимальном режиме одним слоем (а) и двумя смежными слоями (б)

электрод, равным половине ее ширины, а затем осуществляют наплавку другой половины шейки. В результате выполнения наплавки в два этапа

Results of experimental investigations of the effect of the wide-layer hard-facing parameters on characteristics of the deposited layer are presented. Optimal ranges of variations of the process parameters in hard-facing on cylindrical parts 180...300 mm in diameter were determined. Application of the investigation results for development of the technology for repair of large-size crankshafts of diesel generators is shown.

#### Оптимальные режимы широкослойной наплавки коренных и шатунных шеек коленчатого вала дизель-генератора

Параметр режима	Тип шейки коленчатого вала	
	коренной	шатунный
$I_n$ , А	320...340	340...360
$U_d$ , В	27...28	27...28
$v_n$ , м/ч	4,5	5,0
Размах колебаний электрода, мм	50	65
$e$ , мм	8...10	8...10
$n_k$ , мин <sup>-1</sup>	60	60
Количество смежных слоев, шт.	2	2
$t_n$ , мин	6,0	4,0
$l_b$ , мм	25...28	25...28

на шейке формируются два смежных слоя, которые полностью покрывают ее изношенную рабочую поверхность (рис. 5, б).

Разработанная технология широкослойной наплавки прошла опытно-промышленную проверку в АООТ «Первомайскдизельмаш» (г. Первомайск, Украина). Наплавлена, обработана и успешно прошла стендовые испытания партия коленчатых валов, которые в настоящее время находятся в промышленной эксплуатации. Данные о влиянии широкослойной наплавки на усталостную прочность восстановленных крупногабаритных коленчатых валов отсутствуют. Однако многолетний опыт широкослойной наплавки различных типов коленчатых валов подтверждает, что она не оказывает существенного влияния на этот показатель.

Внедрение технологии широкослойной наплавки крупногабаритных коленчатых валов дизель-генераторов показало, что затраты на наплавку составили 22 % стоимости нового коленчатого вала.

Поступила в редакцию 17.07.2009