

6. Beck J.V. Criteria for comparison of methods of colution of the inverse heat conduction problem. — Nucl. Eng. And Des, 1979. 53. — № 1. — P. 11–22.

7. Markin A.D. On improving the dynamic characteristics of the thermal processes control systems. — Rad. XXVI Jugoslovenska konferenzija ETAN. — Subotica., 1982. — P. 71–77.

© Маркин А.Д., Илюшенко В.И., Данильченко Т.А., 2002

ОНИЩЕНКО В.П., КОРИЦКИЙ Г.Г. (ДонНТУ)

СПОСОБ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА ИЗНОШЕННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Предложен метод избирательного восстановления изношенной рабочей поверхности зубьев зубчатых колес с применением технологии электроконтактной наплавки износостойких порошков. Изготовлена и испытана опытная установка для избирательного ремонта зубьев зубчатых колес редукторов тяжело нагруженных машин.

Восстановление работоспособности рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес тяжело нагруженных машин занимает особое место в области ремонта деталей машин из-за сложности формы профиля и высокого уровня требований, предъявляемых к качеству поверхности. К наиболее известным методам восстановления относятся: метод ротационного деформирования, электродуговая наплавка износостойкого слоя, замена зубчатого венца, а также наплавка износостойких порошков. Наиболее предпочтительным является последний способ, так как он не связан с большими затратами энергии на пластическое деформирование зубьев, расплавление значительного объема материала, на нарезание зубьев на новом венце. Дальнейшим шагом по снижению затрат энергии при наплавке порошков на рабочую поверхность зубьев является использование электроконтактного нагрева рабочей зоны [1]. Ввиду возможности локального наращивания изношенной поверхности метод электроконтактной наплавки износостойких порошков (ЭКНП) позволяет обеспечить избирательный ремонт рабочей поверхности зуба, что сводит к минимуму последующую обработку восстановленной поверхности.

При применении метода ЭКНП можно выделить следующие основные этапы:

— нанесение на очищенную и обезжиренную ремонтируемую поверхность соответствующей композиции износостойких порошков со связующим составом, обеспечивающим удержание композиции в рабочей зоне до ее приплавки;

— создание с помощью электрода-обкатника, имеющего форму зубчатого колеса и изготовленного из бронзы, требуемых значений удельных давлений в контактной зоне;

— включение (при электроде, неподвижном относительно ремонтируемой поверхности) сварочного тока заданной силы, обеспечивающей требуемое количество энергии в импульсе;

— отключение сварочного тока после пропускания заданного числа серий из установленного числа импульсов и перемещение (с выдержкой после отключения тока) электрода в новую зону контакта на расстояние, превышающее определенное минимальное значение;

— повторение процесса ЭКНП до тех пор, пока расстояние между зонами наплавки не будут меньше ширины герцовой полоски контакта;

— нанесение нового слоя порошковой композиции и повторение вышеописанного процесса до достижения заданной полной толщины слоя, наплавляемого на ремонтируемую поверхность.

В связи с неуправляемостью процесса разветвления сварочного тока в зоне двух парного зацепления, межосевое расстояние пары «электрод — ремонтируемое колесо» должно быть настроено таким образом, чтобы обеспечить коэффициент перекрытия $\epsilon=1$ [2]. Ширина электрода с целью обеспечения равномерности нагрузки по длине контакта не должна превышать величину, равную удвоенному модулю зацепления.

На основе этих положений были проведены исследования процесса ЭКНП с целью выбора оптимальных режимов и изготовлена опытная полномасштабная установка для ремонта зубьев зубчатых колес приводов тяжело нагруженных машин.

В качестве наплавочного материала были использованы порошки по ГОСТ 21448-75, предназначенные для наплавки и напыления на детали машин, работающих в условиях абразивного изнашивания, коррозии и высоких температур. Сравнительной технологической оценке были подвергнуты порошки ПГ-С27 (У40Х28Н2С2ВМ), ПГ-ФБХ6-2 (У45Х35ГСП) и ПГ-СР3 (ХН80С3Р3) с размерами частиц 0,315–0,400 мм.

Проведенные испытания показали, что в чистом виде указанные порошки для электроконтактной наплавки не пригодны, тогда как смеси этих порошков с железным порошком марки ПЖГК показали более высокую сцепляемость с основным металлом.

В дальнейшем отработка технологических режимов ЭКНП производилась с использованием базовой композиции порошков ПЖГК и ПГ-С27 в пропорции 2:1 при одинаковом гранулометрическом составе. Химический состав порошка марки ПГ-С27 приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав порошка ПГ-С27 (ГОСТ 21448-75)

химич. элемент	C	Cr	Si	Mn	Ni	W	Mo
массовая доля	3.3-4.5	25-28	1.0-2.0	0.8-1.5	1.5-2.0	0.2-0.4	0.08-0.15

Для закрепления композиции порошков на восстанавливаемой поверхности зуба с целью предупреждения его сползания во время перехода обкатника в новое положение, необходимо было подобрать связующий материал, не оказывающий вредного воздействия на показатели качества наплавляемого слоя. В качестве связующего материала были испытаны: гидросиликат натрия, поливинилацетатная эмульсия, технический вазелин и раствор канифоли в скипидаре. Экспериментальные исследования показали, что наилучшими характеристиками — теплостойкостью и прочностью при высокой адгезии к металлической поверхности — обладает раствор канифоли в скипидаре. Наносить порошок следует не позже, чем через 5–10 сек. после нанесения связующего. Такая технология нанесения порошка полностью себя оправдала при наплавке рабочих поверхностей зубьев в непрерывном режиме.

Наиболее важным моментом в разработке технологии электроконтактной наплавки является отработка электромеханических параметров процесса, таких как: удельное давление в зоне сварочного контакта, сила сварочного тока, продолжительность сварочного цикла и его структура.

Испытания показали, что наиболее оптимальной величиной нормального давления в зоне контакта является погонная нагрузка при значениях $q_n=28-30$ Н/мм. При этом механические напряжения, найденные по формуле Герца (контакт сталь-бронза) составляют $\sigma_H=220-240$ МПа.

Сила сварочного тока, из-за больших трудностей непосредственного ее измерения, обычно оценивается косвенно — по напряжению холостого хода сварочного трансформатора. Хорошие показатели стабильности процесса наплавки и сцепляемости наплавленного слоя были получены при напряжении холостого хода трансформатора

$U_0 = 3,6-4,0$ В, что соответствует силе тока $I = 18500-21000$ А при мощности трансформатора $P = 75$ КВа.

Продолжительность сварочного цикла и его структура определяют тепловую нагрузку в зоне наплавки. Длительность нагрева была определена опытным путем и варьировалась с помощью электронного регулятора времени РВТШ-20 в пределах $t = 0,01-0,08$ сек ($0,5-4,0$ полных периода сварочного тока). Тепловая мощность регулировалась сдвигом фазы управляющего сигнала на поджигающих электродах тиристорного переключателя в диапазоне значений 25–100%.

Наиболее важными из показателей качества наплавленного слоя являются стойкость против абразивного изнашивания и контактная прочность, которые и были приняты в качестве базовых. Эти показатели определялись на образцах в форме параллелепипеда ($10 \times 10 \times 60$ мм), на малую грань (10×10 мм) которых методом ЭКНП наносился слой износостойкого порошка. Наплавка порошка и испытание наплавленного слоя на контактную прочность производились на специально изготовленных установках.

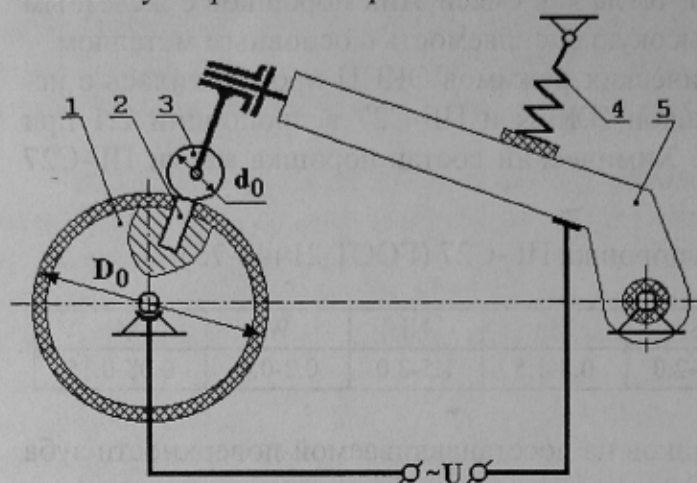


Рис. 1. Кинематическая схема установки для наплавки образцов: 1 — обойма с образцами; 2 — образец; 3 — электрод; 4 — нагрузитель; 5 — рычаг

Кинематическая схема установки для наплавки образцов представлена на рис. 1. Обойма, содержащая 10 образцов, снаружи покрыта изоляционным составом. Поэтому электрод в форме ролика, установленный на изолированном от корпуса рычаге и прижатый к обойме нагрузителем, может иметь электрический контакт только с торцевой поверхностью образца, на которую нанесен слой наплавленного порошка со связующим материалом.

Прерывистое вращение обоймы осуществляется от специального дискретного редуктора [3] с регулируемым передаточным числом, что позволяет устанавливать необходимое время остановки обоймы (для осуществления процесса наплавки порошка) в диапазоне $0,04-0,12$ с с шагом $0,01$ с. Эти значения можно пропорционально увеличить в 2, 3, 4 и 8 раз с помощью сменных шкивов ременной передачи, входящей в привод обоймы. Редуктор снабжен электрическим контактом, включающим сварочную цепь после остановки обоймы. Выключение цепи осуществляется с помощью реле времени до начала движения обоймы.

Диаметр ролика электрода $d_0 = 30,2$ мм определялся по значению приведенного радиуса кривизны в полюсе зацепления зубчатого электрода ($m = 8$ мм, $z = 23$, $x = 0$) и ремонтируемой шестерни ($m = 8$ мм, $z = 16$, $x = 0,8$). Диаметр обоймы был принят равным $D_0 = 340$ мм. При таком значении D_0 хорда (сторона квадрата наплавленной поверхности образца) практически не отличается от дуги окружности. В процессе наплавки образцов производилось осциллографирование характера движения обоймы, силы прижатия электрода и силы сварочного тока. Результаты обработки полученных данных позволили установить оптимальные значения параметров процесса ЭКНП.

Сопrotивляемость изнашиванию оценивалась по методу истирания наплавленного слоя абразивной лентой, прижатой к образцу с удельными давлениями $\sigma = 0,49$ МПа и движущейся со скоростью $0,025$ м/сек. При этом определялось значение

удельного износа μ как отношение потери массы образца в результате его истирания к произведению контактных напряжений на путь абразивного трения. Оценка прочности наплавленного слоя против абразивного изнашивания производилась по относительной износостойкости i_o , которая вычислялась, как отношение удельного износа образца из отожженной стали марки 45 — μ_{45} (принятого за эталон) к удельному износу наплавленного образца — μ_n .

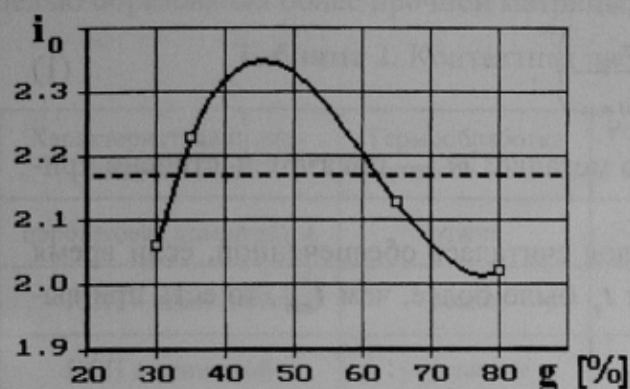


Рис. 2. Влияние состава композиции порошка на износостойкость наплавленного слоя: — наплавленный слой, - - - сталь 45 (52HRC)

эффективности спекания порошков.

Испытания наплавленного слоя на контактную прочность производилась на установке, схема которой представлена на рис. 3. Параметры установки определены из условия моделирования околополюсной зоны контакта зубчатой передачи с параметрами: $m=8$ мм, $Z_1=22$, $Z_2=70$ при окружной скорости $V=3,3$ м/сек. Диаметр ролика принят по значению приведенного радиуса кривизны этой передачи — $d=45,8$ мм. Угловая скорость обоймы из условия сокращения длительности испытаний и ограничения динамических нагрузок в зоне контакта была принята равной $\omega=100$ рад/сек. Соответственно диаметр окружности размещения образцов на торце обоймы равен $D=66,2$ мм.

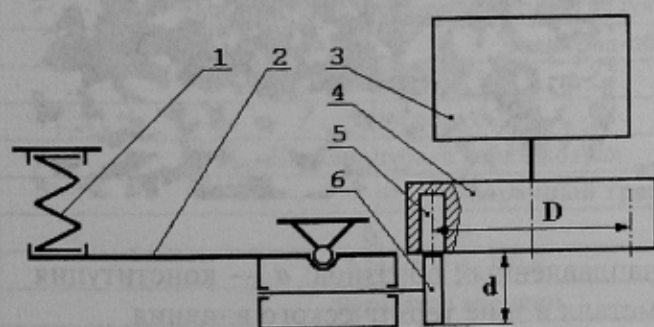


Рис. 3. Схема установки для испытания образцов на контактную прочность: 1 — нагрузчитель, 2 — опора поворотная, 3 — привод, 4 — обойма с образцами, 5 — образец, 6 — ролик

Значения относительной износостойкости i_o (при доверительной вероятности 0,95) в зависимости от g — доли износостойкого порошка ПГ-С27 в его композиции с базовым порошком ПЖГК (формирующим ферритную матрицу, которая обеспечивает сцепление с основным металлом и удержание прочных частиц) представлены на рис. 2, откуда следует, что композиция, содержащая 40–50% износостойкого порошка является оптимальной. Дальнейшее увеличение количества прочного износостойкого порошка в композиции приводит к снижению износостойкости из-за уменьшения доли связки и снижения

В связи с тем, что окружные скорости точек образца по длине контактной линии зависят от их расстояния от оси вращения обоймы, а окружные скорости всех точек поверхности ролика одинаковы, имеет место относительное скольжение в пределах $\pm 12\%$, что соответствует скольжению зубьев в околополюсной зоне.

Емкость обоймы позволяет одновременно испытывать четыре образца, что сокращает время испытаний и уменьшает разброс результатов. Ширина ролика с целью обеспечения равномерности нагрузки по длине контакта принималась на 40%

меньше ширины образца. Прочность элементов установки позволяла создать контактные напряжения до 3000 МПа.

Оценка контактной прочности наплавленного слоя производилась следующим образом. С целью сокращения времени испытаний создавалась нагрузка, обеспечивающая контактные напряжения в два раза превышающие длительный предел выносливости основного металла: $\sigma_{Hmax} = 2\sigma_{Ho}$. По кривой усталости определялось минимально необходимое время испытаний:

$$t_{min} = \frac{\pi N_o}{1800 \omega} \left(\frac{\sigma_{Ho}}{\sigma_{Hmax}} \right)^m, \quad (1)$$

где N_o — базовое число циклов для основного металла; m — показатель степени кривой усталости.

Контактная прочность наплавленного слоя считалась обеспеченной, если время испытаний до разрушения наплавленного слоя t_e было более, чем t_{min} , то есть при выполнении условия:

$$\varphi = \frac{t_e}{t_{min}} \geq 1. \quad (2)$$

Наплавка слоя порошка осуществлялась при напряжении холостого хода сварочного трансформатора $U_o = 4$ В. При этом задавались следующие параметры сварочного режима: n_i — число импульсов за время остановки обоймы и k_p — мощность импульса в % от номинального значения.

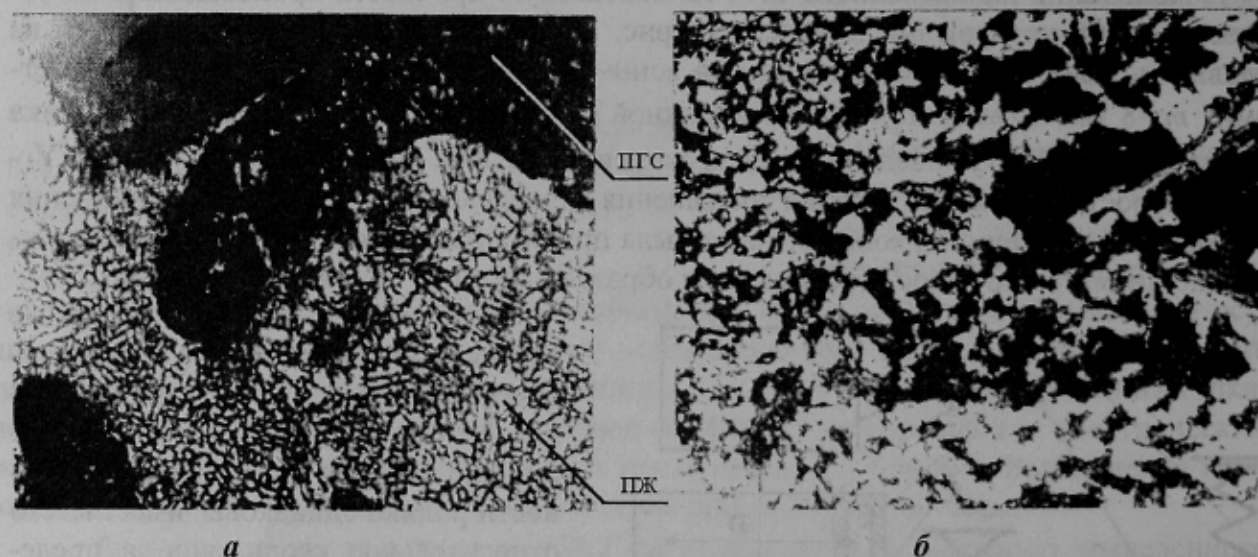


Рис. 4. Фотографии микроструктур наплавленных образцов: *а* — конституция износостойкой композиции; *б* — основной металл в зоне термического влияния

Предварительные результаты испытаний показали, что порошковая композиция не обеспечивает достаточную контактную прочность. Лучшие результаты получены при использовании предварительно спеченных пластинок (ПСП) из этой композиции в режиме спекания $n_i : k_p = 10:10$.

Анализ структуры наплавленного и основного металла, представленной на микрофотографиях (рис. 4), позволяет сделать вывод, что в наплавленном слое преимущественно сохраняются неизменными частицы износостойкого порошка. Зона контакта независимо от исходного состояния основного металла и режима наплавки остается

бездефектной, а структурные изменения в зоне термического влияния не оказывают пагубного воздействия на работоспособность наплавленного слоя.

Результаты испытаний, представленные в таблице 2, показывают, что композиция из износостойкого порошка ПГ-С27 и железного порошка ПЖГК может эффективно применяться только для ремонта зубчатых колес из сталей подвергаемых нормализации и улучшению, то есть при твердости до 35HRC. Для ремонта поверхностей зубьев с более высокой твердостью необходимо разработать новую композицию порошков с целью образования более прочной матрицы, чем ферритная.

Таблица 2. Контактная прочность наплавленного слоя

Характеристика припечаемого слоя	Термообработка основного металла	Режим припекания: $n_i : k_p$	Φ	Состояние поверхности после испытания
порошковая композиция	отжиг	5 : 70	0.45	трещины и отслаивание наплавленного слоя
ПСП в один слой	отжиг	10 : 50	1.91	единичные трещины без отслаивания
ПСП в один слой	улучшение	10 : 50	1.00	трещин нет, значительная пластическая деформация
ПСП в два слоя	отжиг	10 : 50	1.91	отслаивание отсутствует

На основании разработанной технологии нанесения износостойкого слоя и исследований прочности его сцепления с основным металлом была сконструирована и изготовлена натурная опытная установка УНЗ-2 для избирательного ремонта зубьев зубчатых колес, параметры которой приведены в таблице 3.

Таблица 3. Техническая характеристика установки УНЗ-2

Ремонтируемые прямозубые зубчатые колеса	
Модуль, мм	4–16
Диаметр, мм	160–500
Привод	
Мощность электродвигателя, ватт	180
Частота вращения ротора, об/мин	1350
Передаточное число ременной передачи	1, 2, 3, 4, 5
Передаточное число дискретного редуктора	88.231–286.750
Электрод-обкатник	
Модуль, мм	4–16
Число зубьев	17, 19, 23
Ширина зуба, в долях модуля	2
Сварочный трансформатор	
Тип	ТК-403-У4
Мощность, КВА	100
Регулятор времени	РВТШ-20
Габариты установки (мм)	
Длина	1175
Ширина	725
Высота, мм	1400

Установка (рис. 5) представляет собой замкнутый контур из четырех зубчатых колес: ремонтируемое колесо, электрод-обкатник и их контрольные копии (контрольные колеса). Контрольные колеса и электрод-обкатник имеют меньшую ширину зубча-

того венца, но изготовлены с более высокой степенью точностью по сравнению с ремонтируемым колесом.

Источник тока подсоединен к ремонтируемому колесу и к изолированному от корпуса электроду-обкатнику. Установка позволяет изменять межосевое расстояние передач замкнутого контура в пределах диапазона ремонтируемых колес. Электрод-обкатник имеет возможность перемещения в направлении оси вращения с последующей жесткой фиксацией на валу.

Нагружение контура производится пружинным нагрузителем, который выполняет одновременно и функцию измерителя кинематической погрешности ремонтируемого колеса. Измеритель снабжен выключателем сварочной цепи и по достижении в определенной точке профиля ремонтируемого колеса нулевого значения кинематической погрешности сварочная цепь разрывается и наплавка не происходит, связка не наплавленной композиции разрушается и избыток порошка осыпается. Таким образом, осуществляется избирательная наплавка материала только в тех местах зуба, где имеет место износ профиля.

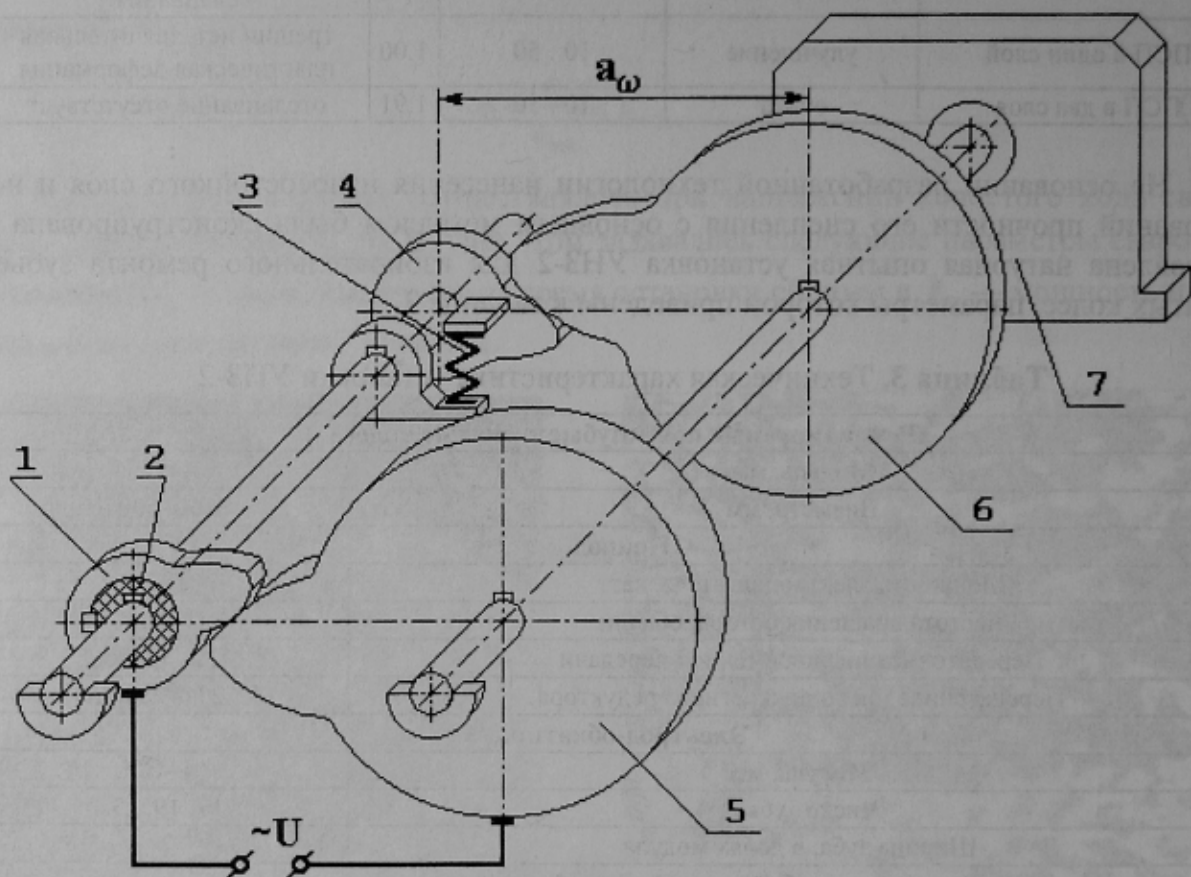


Рис. 5. Схема установки УНЗ-2: 1 — электрод-обкатник; 2 — изолятор; 3 — нагрузитель; 4 — контрольное колесо электрода; 5 — ремонтируемое колесо; 6 — контрольное колесо; 7 — привод

Дискретный редуктор, помимо формирования прерывистого вращения и включения сварочной цепи при остановке системы, обеспечивает, при соответствующей настройке, необходимую плотность распределения точек приплавки по длине эвольвенты ремонтируемого колеса. Передаточное число дискретного редуктора i_d и угол поворота ремонтируемого колеса между остановками $\Delta\varphi$ определяются по формулам:

$$i_d = \frac{Z_{до}}{k}; \quad (3)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{i_d}, \quad (4)$$

где $Z_{do}=1147$ — постоянная дискретного редуктора; $k = \{4,5,6,7...13\}$ — параметр настройки редуктора.

Криволинейная координата сварочной точки, измеренная по длине эвольвенты ремонтируемого колеса от основной окружности определяется из выражения:

$$L_n = \frac{R_b}{2} (\varphi_j + n\Delta\varphi)^2, \quad (5)$$

где R_b — радиус основной окружности ремонтируемого колеса; φ_j — эвольвентная угловая координата начальной точки приплавки; n — порядковый номер оборота ведущего вала дискретного редуктора.

Из формулы (5) следует, что при постоянном значении угла $\Delta\varphi$ расстояние между соседними точками наплавки будет неравномерным. Однако, благодаря тому, что значение i_d не является целым, то по завершению полного j -того оборота колеса угловая координата начальной точки будет определяться дробной частью передаточного числа $frac(i_d)$ и станет равной:

$$\varphi_{j+1} = \varphi_j + \Delta\varphi frac(i_d). \quad (6)$$

Подбором параметров настройки редуктора и увеличением времени работы установки можно добиться практически равномерного распределения точек приплавки по длине эвольвенты. Для оптимизации этого процесса разработаны соответствующие компьютерные программы.

С применением вышеописанной технологии электроконтактного припекания износостойких порошков выполнены экспериментальные исследования процесса ремонта зубчатых колес редуктора привода тяжело нагруженной рабочей машины ($m=8$ мм, $Z_1=16$, $Z_2=51$).

На основе проведенных исследований разработана и экспериментально проверена технология избирательного ремонта изношенных поверхностей зубьев зубчатых колес методом электроконтактного припекания износостойких порошков. Доказано, что высокопрочные порошки должны использоваться в композиции с менее прочными, близкими по свойствам к основному металлу, с целью формирования в процессе припекания матрицы, удерживающей частицы прочных порошков и обеспечивающей сцепление с основным металлом. В частности, ферритная матрица на базе железных порошков может применяться только для зубьев из улучшенных сталей. Разработана, изготовлена и экспериментально проверена конструкция полномасштабной установки для ремонта зубьев зубчатых колес приводов тяжело нагруженных машин.

Список литературы

1. **Онищенко В.П., Корицкий Г.Г. и др.** Способ восстановления изношенных зубчатых колес. Авт.свид. СССР №976570, 1982.
2. **Онищенко В.П., Корицкий Г.Г. и др.** Способ восстановления изношенных зубчатых колес. Авт.свид. СССР №1098145, 1984.
3. **Порошин И.И.** Методические рекомендации по расчету и конструированию дискретных передач. / Донецкий ПромстройНИИпроект Госстроя СССР. — Донецк, 1979.

© Онищенко В.П., Корицкий Г.Г., 2002