

– безотходность производства, возможность изготавливать из нужных материалов только сами зубья, т. е. экономия материалов;

– возможность изготовления тех зубчатых венцов, которые трудно обработать обычными способами: внутренних зубьев, зубьев нестандартного профиля, некруглых зубчатых колес.

В данной статье нами пройден важный этап на пути к созданию упомянутых выше технологий – осуществлен выбор математического аппарата для количественного описания зубчатых лент. Составлена обобщенная формула флексагонов, предназначенных для изготовления зубчатых венцов.

#### Библиографические ссылки

1. Пат. DE2063266, МПК В21D53/16; В21D53/28; F16C35/077; Rapid production of tolerance rings from-coiled strip / KOCH HANS W ; Оpubл. 1971-06-24. – 24 с.

2. Пат. CN202971814, МПК F16H55/06; F16H55/17. Anti-lock high-performance induction tooth ring for powder metallurgy / LIU WENHAI; ZHU JIANGHONG; XIE TIENAN ; Оpubл. 2013-06-05. – 6 с.

3. Изобретение SU837507 МПК: В21D53/28 В21D53/28. Способ изготовления шлицевых венцов / А. И. Осколков, О. Б. Миндрул, В. М. Голяшкин. – Оpubл. 1981-15-06. – 3 с.

4. Изобретение SU1771860 МПК: В21К1/30. Способ получения зубчатых колес / Д. И. Дмитриевич, А. А. Ластовенко, Е. М. Макушок. – Оpubл. 1992-30-10. – 4 с.

Получено 27.02.2017

5. Пат. US3739459 МПК: E02D5/04 E02D5/28, В23К31/02. Method of manufacture of a ribbed pile / A. Otani. – Оpubл. 1973-06-19. – 6 с.

6. Пат. RU2107652 МПК: В01J19/32, В21D13/04, В65Н45/20. Устройство для изготовления косопрессированной ленты и способ изготовления косопрессированной ленты / Филип Зюесс, Артин Бэр, Ксавер Штекли. – Оpubл. 1998-03-27. – 10 с.

7. Заявка на изобретение РФ 2015153632 МПК В21d5/00; В21d53/28. Способ формообразования зубчатого венца / Г. Ю. Волков, С. А. Киселев. Заявл. 14.12.2015.

8. [http://encyclopaedia.bid/википедия/Флексагон#cite\\_note-5](http://encyclopaedia.bid/википедия/Флексагон#cite_note-5)

9. *Гарднер Мартин*. Математические головоломки и развлечения = Mathematical Puzzles and Diversions / пер. Ю. А. Данилова ; под ред. Я. А. Смородинского. – Изд. 2-е. – М. : Мир, 1999. – ISBN 5-03-003340-8.

10. *Pook Les*. Serious Fun with Flexagons: A Compendium and Guide. – 2009 edition (August 17, 2009). – Springer. – 346 с. – ISBN 978-90-481-2502-9.

11. Там же.

12. *Кан И*. Аномальные флексагоны // Квант. – 1992. – № 10. – С. 57–59.

13. [http://encyclopaedia.bid/википедия/Флексагон#cite\\_note-5](http://encyclopaedia.bid/википедия/Флексагон#cite_note-5)

14. Пат. US3739459 МПК: E02D5/04 E02D5/28, В23К31/02. Method of manufacture of a ribbed pile.

15. Заявка на изобретение РФ 2015153632 МПК В21d5/00; В21d53/28. Способ формообразования зубчатого венца.

УДК 621.791.92 : 621.81

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-47-51

**Г. С. Горбунов**, студент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**К. С. Морозов**, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**С. Д. Соловьев**, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## КЛАССИФИКАЦИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССОВ НАПЛАВКИ

**Н**значение наплавки – ремонт восстановлением размеров изношенных и бракованных деталей, а также изготовление новых деталей с заданными характеристиками за счет расплавления присадочного материала и его нанесения на рабочую или изношенную поверхности. Трудности, с которыми сталкивается технолог при разработке технологии наплавки, обусловлены большим количеством способов наплавки, многовариантностью режимов проведения процесса, применяемых присадочных и других вспомогательных материалов, условиями производства, количеством, формой и размерами наплавляемых деталей, величиной износа их поверхностей.

Наряду с широко известными способами сварки за последнее время разработаны новые, такие как СМТ, ВКЗ, *STT*-процесс и др. [1], реализующие различные системы управления каплепереносом рас-

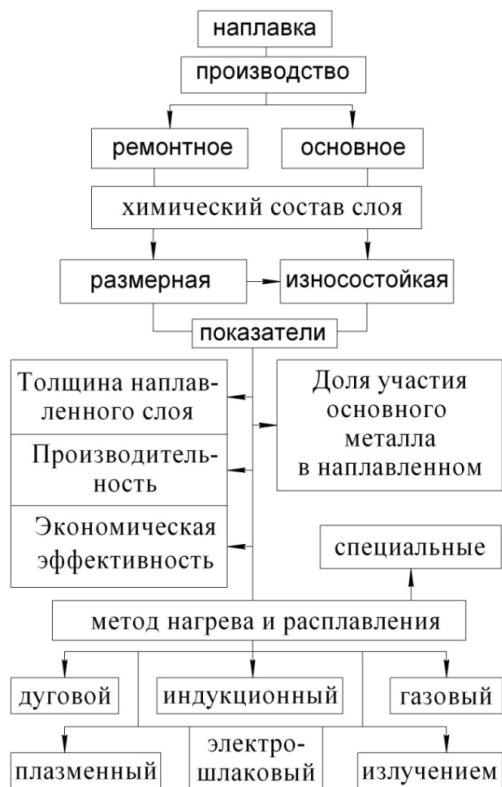
плавленного электродного металла на свариваемые кромки за счет модулирования сварочного тока, которые также могут применяться в технологическом процессе наплавки. Поэтому обеспечение специалистов производства современными сведениями об основных характеристиках, достоинствах и недостатках процессов позволит ориентироваться в выборе способов и технологий наплавки для решения конкретных производственных задач.

Цель работы – анализ технико-экономических показателей способов наплавки в технологическом цикле производства.

В технологическом цикле производства можно выделить следующие направления применения наплавки (см. рисунок).

1. Ремонтное производство. Наплавка применяется для восстановления исходных размеров изношенных или поврежденных деталей. Если наплавляемый

слой металла может быть близок по химическому составу и свойствам к основному металлу (восстановительная размерная наплавка [2]), то в этом случае способ наплавки выбирается по следующим показателям: толщина наплавленного слоя за один проход; производительность, технико-экономическая эффективность процесса.



Классификация и показатели методов наплавки

Если при ремонте будет наплавляться металл, существенно отличающийся по своему химическому составу от основного, что диктуется теми свойствами, которые должен иметь поверхностный слой, то процесс его нанесения считается восстановительной износостойкой наплавкой [2] (см. рис.). В этом случае основным технологическим показателем процесса является содержание основного металла в наплавленном слое – доля его участия (табл. 1). Данная операция относится к ремонтным работам и позволяет иногда надолго продлить сроки эксплуатации изделия без больших затрат на изготовление (приобретение) новой детали.

2. Основное производство – наплавка применяется для изготовления новых деталей с целью обеспечения требуемых свойств конкретных поверхностей. В этом случае заготовка детали изготавливается из относительно недорогих сталей или сплавов. Затем на рабочие поверхности, подверженные интенсивному износу при эксплуатации изделия, наплавляют слой (слои) металла заданного химического состава и свойств (например, бронзу, заменяя тем самым целиком бронзовую деталь, и т. п. [3]). В этом случае, как и при восстановительной износостойкой наплавке (см. рис.), основным технологическим показателем процесса является содержание основного металла в наплавленном слое. Чем меньше металла основы попадает в слой, тем меньше изменения химического состава (а значит, и свойств) происходят в наплавленном металле. Поэтому одно из основных требований, предъявляемых ко всем методам и способам наплавки, – при нанесении слоя процесс должен обеспечивать минимальное расплавление основного металла и формирование между ним и наплавляемым металлом межзатомных связей [4].

Таблица 1. Технологические показатели способов наплавки

| Метод и способы наплавки                                     | Производительность, кг/ч | Содержание основного металла в наплавленном слое (доля участия), % | Толщина наплавленного слоя, мм | Литература |
|--|--------------------------|--|--------------------------------|------------|
| Газовый  |                          |  |                                |            |
| С присадкой прутка или проволоки                             | 0,5...1,5                | 1  | 0,8...5,0                      | 4          |
| С присадкой в виде порошка                                   | 0,5...3,0                | 1  | 0,3...3,0                      |            |
| Дуговой  |                          |  |                                |            |
| Аргонодуговая неплавящимся электродом (TIG)                  | 1,0...7,0                | 10...30  | 2,5...5,0                      | 11         |
| Аргонодуговая плавящимся электродом (MIG)                    | 1,5...9,0                | 30...60  | 0,3...5,0                      | 4, 11      |
| Плавящимся электродом в защитном газе CO <sub>2</sub>        | 1,5...4,5                | 12...45  | 0,5...3,5                      | 3          |
| Ручная дуговая, покрытыми электродами                        | 0,8...3,0                | 20...50  | 2,0...5,0                      | 4          |
| Под флюсом: одной проволокой                                 | 2...12                   | 30...60  | 3,0...5,0                      |            |
| многоэлектродная   | 5...40                   | 15...30  | 5,0...8,0                      |            |
| лентой   | 5...40                   | 10...20  | 2,5...5,0                      |            |
| Самозащитной проволокой                                      | 2...9                    | 25...50  | 2,5...5,0                      |            |
| лентой   | 10...20                  | 15...40  | 2,5...5,0                      |            |
| Вибродуговая   | 1,2...3                  | 8...20   | 0,3...2,5                      | 9          |
| ТНВ, процесс «TIG Hot Wire»                                  | 1,7...5                  | 5...10   | до 3                           |            |
| Процесс Cold Metal Transfer – «холодный перенос металла» CMT | до 6,5                   | менее 5  | до 3                           |            |
| CMT TWIN – «двойная проволока»                               | 12... 14                 | менее 5  | до 4                           |            |

Окончание табл. 1

| Метод и способы наплавки  | Производительность, кг/ч | Содержание основного металла в наплавленном слое (доля участия), % | Толщина наплавленного слоя, мм | Литература |
|---|--------------------------|--|--------------------------------|------------|
| <b>Электрошлаковый</b>  |                          |  |                                |            |
| Двумя электродными лентами  | 10...60                  | 5...15   | 1,5...5,0                      | 4          |
| Электродными проволоками  | 20...60                  | 10...20  | 6...50                         |            |
| Зернистым присадочным материалом                                  | 20...200                 | 5...10   | 15...50                        |            |
| <b>Плазменный</b>   |                          |  |                                |            |
| Порошком  | 0,8...6,0                | 5...15   | 0,3...6,0                      | 4          |
| С токоведущей присадочной проволокой из меди, бронзы, латуни      | –                        | 0  | –                              | 13         |
| С токоведущей присадочной проволокой из стали аустенитного класса | –                        | 3...5  | –                              |            |
| <b>Индукционный</b>   |                          |  |                                |            |
| Токами высокой частоты  | 2...15                   | 5...15   | 0,4...3,0                      | 4          |
| <b>Лучевой</b>  |                          |  |                                |            |
| Лазерная  | до 5                     | 5...7  | до 0,1                         | 4, 5       |
| Электроннолучевая   | до 2                     | 3...5  | 0,2...3                        | 5          |
| <b>Специальные</b>  |                          |  |                                |            |
| Электромагнитная  | 50 см <sup>2</sup> /мин  | –  | до 2                           | 8          |
| Электроконтактная   | 1,0...2, 8               | 0...35   | 0,2...1,5                      | 3, 7       |
| <b>Другие</b>   |                          |  |                                |            |
| Независимой трехфазной дугой косвенного действия                  | –                        | 5...10   | –                              | 10         |
| Трением   | –                        | –  | 0,01...0,5                     | 12         |

\* данные при однослойной наплавке; – данные отсутствуют

Доля участия основного металла в наплавленном слое зависит от выбранного процесса наплавки, которые сгруппированы по физическому принципу применяемого источника тепловой энергии, используемого для нагрева и расплавления наплавляемого металла (см. рис.). Так, в дуговую группу входят способы наплавки, использующие в качестве источника нагрева электрическую сварочную дугу (практически те же способы сварки) (см. табл. 1). В свою очередь, способы в группе подразделяются по техническим (способам защиты металла в зоне наплавки, степени механизации, непрерывности процесса и т. п.) и технологическим (по роду тока, количеству электродов, наличию внешнего воздействия на наплавленный металл и т. п.) признакам (см. табл. 1).

Физические различия в природе источников тепловой энергии обуславливают и различия в тепловой подготовке основного и наплавляемого металлов. Так, например, при плазменной наплавке с токоведущей присадочной проволокой тепловложение от источника нагрева преимущественно осуществляется в присадочную проволоку, а основной металл подогревается лишь достигающими его поверхности остывающими потоками плазмы и теплотой перегретого жидкого расплавленного металла проволоки. В этом случае проплавление основного металла заметно меньше по сравнению со способами наплавки, в которых используется электрическая сварочная дуга прямого действия (см. табл. 1). При дуге прямого действия на основном металле располагается катодное или анодное пятно дуги с температурами порядка 2400 и 2600 °С [15], и ограничить расплавление основного металла и его переход в наплавленный

значительно труднее, особенно при значительном сосредоточении дугового разряда (уменьшении диаметра плавящегося электрода, увеличении плотности тока в электроде). В этом случае рассредоточение тепловложения в основной металл удается осуществить, например, при использовании ленточного электрода в процессе наплавки под слоем флюса, когда дуга перемещается по торцу ленты от одного конца к другому, а иногда возникает одновременно в нескольких местах, что заметно снижает долю участия основного металла в наплавленном (см. табл. 1) и увеличивает ширину наплавленного слоя [6]. Снижению доли участия основного металла в наплавленном слое способствует и применение процессов управляемого каплепереноса, таких как *TIG Hot Wire* и *Cold Metal Transfer* – «холодный перенос металла» модулированным током при достаточно высокой их производительности (см. табл. 1). Иногда эффективно использование колебания электрода или лазерного (электронного) луча в поперечном направлении относительно направления наплавки. При этом тепловой поток от источника нагрева распределяется на большую площадь, что уменьшает глубину расплавления основного металла и снижает тем самым его содержание в наплавленном. Данным приемом при ручной дуговой наплавке штучными электродами удается снизить до 5-8 % содержание основного металла в наплавленном [4] по сравнению с 20-50 % без колебаний электрода (см. табл. 1). Не исключается и проведение многослойной наплавки, позволяющей уменьшать содержание основного металла в каждом последующем слое. При наплавке большого числа слоев состав металла поверхностного слоя может

быть идентичен составу наплавляемого металла (составу электродов, проволок, лент). Однако данный прием увеличивает материальные и энергетические затраты на производство наплавленных деталей.

Большое влияние на химический состав наплавленного металла при всех способах наплавки оказывают режимы ведения процесса. При выбранном

способе для конкретных составов наплавочных материалов, материала и конфигурации наплавляемой детали следует выбирать оптимальные режимы наплавки, приведенные в ряде работ [2, 3, 8, 13], которые обеспечивают минимальные припуски на последующую механическую обработку наплавленной поверхности (табл. 2).

Таблица 2. Техничко-экономические показатели методов наплавки [3]

| Процесс наплавки        | Припуск на механическую обработку, мм | Минимальный диаметр наплавляемой детали, мм | Коэффициент производительности (толщина покрытия до 1 мм), $K_p$ | Коэффициент технико-экономической эффективности, $K_s$ |
|-------------------------|---------------------------------------|---|--|--|
| Под флюсом              | 0,8...1,5                             | 45  | 1,62...1,45  | 0,436  |
| Вибродуговой            | 0,7...1,3                             | 10  | 0,85...0,72  | 0,25   |
| В среде CO <sub>2</sub> | 0,7...1,3                             | 15  | 1,82...1,77  | 0,403  |
| Электроконтактный       | 0,2...0,5                             | 15  | 2,3...2,1  | 0,66   |
| Порошковыми проволоками | 0,6...1,2                             | 20  | 1,75...1,54  | 0,4  |
| Газовый                 | 0,4...0,8                             | 12  | 0,73...0,58  | 0,138  |
| Плазменный              | 0,4...0,9                             | 12  | 2,2...1,9  | 0,56   |
| Ручной дуговой          | 1,1...1,7                             | 45  | 1,0  | 0,314  |
| Аргонодуговой           | 0,4...0,9                             | 10  | 2,1...1,7  | 0,171  |

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что наименьшие припуски обеспечивают такие процессы наплавки, как электроконтактный, газовый, плазменный и аргонодуговой. Однако у газового метода низкие показатели производительности (коэффициент  $K_p$ ) и технико-экономической эффективности (коэффициент  $K_s$ ). Наилучшими показателями обладает электроконтактный метод наплавки (см. табл. 2), недостатком которого является необходимость применения специального оборудования. Из широко применяемых в производстве методов хорошим сочетанием производительности и экономичности обладает способ электродуговой наплавки в среде защитного газа CO<sub>2</sub> (см. табл. 2). Однако ведение дугового процесса в активных защитных газах (в CO<sub>2</sub> и смесях на его основе) приводит к потере легирующих элементов из состава наплавочной проволоки за счет их окисления кислородом, образующимся в результате диссоциации молекулы CO<sub>2</sub> под действием высокой температуры столба дуги [4–6]. В этом случае для получения заданного химического состава наплавленного слоя потребуются более легирующая наплавочная проволока.

Поскольку процессы наплавки аналогичны соответствующим процессам сварки, то и при наплавке возможно получение наплавленного слоя с особыми, нужными для эксплуатации свойствами с применением следующих материалов [6].

1. Порошковые проволоки (или ленты). Они позволяют вводить в наплавленный металл 10...70 % легирующих элементов (от массы проволоки) и сейчас широко применяются для создания наплавленных слоев практически с любыми свойствами во многих отраслях мировой промышленности [9]. Это объясняется относительной простотой создания нужной по химическому составу металлопорошковой шихты – наполнителя проволоки или ленты. В зависимости от ее состава такая проволока или лента может при наплавке использоваться без до-

полнительной защиты зоны горения дуги (самозащитные проволоки), либо под флюсами (в основном нейтральными), либо в среде инертных газов или их смесей.

2. Углеродистые или легированные проволоки, холоднокатаные ленты в сочетании со слабоокислительными плавными или керамическими флюсами. В последнем случае возможно также применение легированных керамических флюсов в сочетании с низколегированной проволокой или лентой. В этом варианте через флюс в наплавленный металл можно ввести до 36 % легирующих элементов [6].

3. Дополнительные легирующие элементы, вводимые через порошок или присадочную проволоку. В первом случае порошок нужного состава засыпается на наплавляемую поверхность, а во втором – присадочная проволока, подключенная в сварочную цепь, вводится в дугу. В случае наплавки в инертных газах (или их смесях) легирование осуществляется за счет применения проволок сплошного сечения либо порошковых, а также дополнительных проволок, вводимых в дуговое пространство, либо укладываемых на наплавляемую поверхность порошков или паст нужного состава [8, 14]. Однако использование насыпанного порошка затрудняет процесс наплавки в связи с возможным его раздуванием плазменными потоками дуги и отсутствием стабильности легирования по длине наплавки из-за сепарации частиц. В этом случае на наплавляемую поверхность укладывают брикеты из предварительно спрессованных, спеченных или скрепленных какой-нибудь связующей добавкой порошков, а в качестве источника нагрева используют дугу с неплавящимся электродом, плазму или токи высокой частоты [6].

Существуют и менее распространенные способы наплавки, объединенные в группу специальных (см. рис). К ней относятся: электромагнитный, электроконтактный, трением и другие процессы наплавки, не получившие в производстве широкого приме-

ния, но также направленные на получение слоев с минимальным содержанием в них основного металла (см. табл. 1).

На практике для различных металлов и наплавляемых поверхностей могут быть применены одни и те же способы наплавки. Каждый способ имеет свои показатели по содержанию основного металла в наплавленном слое и его толщине, производительности процесса, материальных и энергетических затрат. Поэтому при выборе наилучшей технологии изготовления или восстановления конкретной номенклатуры деталей необходимо предусмотреть решение комплекса вопросов, отражающих реальные условия производственной деятельности предприятия, его тип, форму организации, учитывающую объем и конструкторско-технологическую номенклатуру деталей, транспортные затраты. При восстановлении деталей должно быть обеспечено основное техническое требование долговечности – минимальный ресурс восстановленных деталей должен быть не ниже межремонтного ресурса работы машины [3].

#### Выводы

1. Предложена классификация технологических способов наплавки, позволяющая проводить их анализ и выбирать наиболее рациональный процесс, отвечающий технологическим и экономическим требованиям современного производства.

2. Проведенные систематизация и анализ позволяют использовать их как базу данных для автоматизированного метода проектирования технологических процессов ремонтной и износостойкой наплавки поверхностей различных деталей.

#### Библиографические ссылки

1. *Гладков Э. Г., Бродягин В. Н., Перковский Р. А.* Автоматизация сварочных процессов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 421 с.

Получено 27.03.2017

2. *Грохольский Н. Ф.* Восстановление деталей машин и механизмов сваркой и наплавкой. – М. : Машиностроение, 1966. – 275 с.

3. *Сидоров А. Н.* Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М. : Машиностроение, 1987. – 192 с.

4. *Сварка и свариваемые материалы : справочник / под ред. В. Н. Волченко.* – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. – Т. 2. – 576 с.

5. *Сварка. Резка. Контроль : справочник / под ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова.* – М. : Машиностроение, 2004. – Т. 2. – 480 с.

6. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б. Е. Патона.* – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.

7. *Булкбаева Г. Ж.* Пластическое деформирование наплавленного слоя на плоской поверхности детали : дис. ... канд. тех. наук. – Кутаиси, 2016. – 100 с.

8. *Восстановление деталей машин : справочник / под ред. В. П. Иванова.* – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.

9. *Современные технологии дуговой наплавки / С. Л. Бычковский, И. Б. Топоров, Н. О. Кудряшов, Е. И. Павлов.* – URL: <https://www.mngz.ru/economy/827366-sovremennye-tehnologii-dugovoy-naplavki.html>

10. *Безруких А. А., Свитнева Л. М.* Исследование процесса наплавки трехфазной дугой косвенного действия. – URL: <https://socionet.ru/publication.xml?h=spz:cyberleninka:33081:16456074>

11. *Кононенко В. Я.* Ручная и механизированная дуговая сварка и наплавка. – Киев : Украина, 2009. – 456 с. – URL: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=77792>

12. *Наплавка и наварка деталей.* – URL: <http://studopedia.org/1-13266.html>

13. *Плазменная наплавка металлов / А. Е. Вайнерман, М. Х. Шоршоров, В. Д. Веселков, В. С. Новосадов.* – М. : Машиностроение, 1969. – 192 с.

14. *Соловьев С. Д., Дементьев В. Б.* Кинетика образования межатомных связей в биметаллах. – Ижевск : Изд-во Института прикладной механики УрО РАН, 2006. – 152с.

15. *Каракозов Э. С., Мустафаев Р. И.* Справочник молодого электросварщика. – М. : Машиностроение, 1992. – 302 с.

УДК 621.92+621.833

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-51-54

**А. Э. Волков**, доктор технических наук, профессор, МГТУ «Станкин»

**В. И. Медведев**, доктор технических наук, доцент, МГТУ «Станкин»

## ЗАДАЧИ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Детали с винтовыми поверхностями применяются для передачи движения и усилия в машинах и механизмах. Исследованию процессов обработки этих деталей посвящено большое количество работ [1–6]. Одним из основных методов получения точной винтовой поверхности является шлифование профильным абразивным кругом.

При использовании известных механизмов правки шлифовального круга по дуге эллипса или параболы с неизбежностью возникает вопрос точности изготовления требуемой винтовой поверхности. На современных станках имеется возможность задать в осевом сечении шлифовального круга произвольный профиль. Это позволяет править круг по точно