

УДК 621.01

## ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОТКРЫТОГО МНОЖЕСТВА СПОСОБОВ ОБКАТНОГО ЗУБОДОЛБЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)

С системных позиций описываются пионерный способ обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес с радиальным врезанием, а также производные от него первообразные способы с касательным и спиральным врезанием. Анализируются специфические особенности обкатного зубодолбления – явление затирания, особенности стружкообразования. Рассматриваются пути минимизации влияния этих явлений на размерную стойкость зуборезных долбяков. Показано с точки зрения синергетики, что на поле ветвящихся путей эволюции открытого множества способов обработки цилиндрических зубчатых колес обкатное зубодолбление образует аттрактор (коридор) целенаправленного развития подмножеств способов обкатного зубодолбления, различающихся видом движения врезания.

**Ключевые слова:** обкатное зубодолбление, эволюция, цилиндрические колеса, размерная стойкость, максимизация.

**Введение.** Развитие теории зубчатых зацеплений стало объективной предпосылкой изобретения пионерных способов нарезания зубчатых колес при их профилировании обкатом, обеспечивших революционные преобразования в области их формообразующей обработки. В частности, впервые в мировой практике фирма «Феллоу» (США) в 1905 году выпустила первый зубодолбежный станок для нарезания цилиндрических прямозубых колес зуборезным долбяком [1]. Таким образом, на основе научного подхода были изобретены способ обкатного зубодолбления, зуборезный долбяк и соответствующий зубодолбежный станок. В основу воспроизведения профиля зубьев цилиндрического колеса по пионерному способу обкатного зубодолбления положено зацепление пары зубчатых колес. Ниже рассматривается целенаправленная эволюция обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес.

**Пионерный способ обкатного зубодолбления с радиальным врезанием.** По пионерному способу обкатного зубодолбления (рис. 1) заготовка 1 относительно долбяка 2 устанавливается в плоскости  $A-A$ , совпадающей с плоскостью осей заготовки и долбяка. Процесс получения зубчатого колеса осуществляется в результате сообщения долбяку и заготовке нескольких формообразующих и вспомогательных движений. Линия зуба (образующая) зубчатого колеса – прямая, параллельная оси заготовки, – воспроизводится элементарным движением  $\Phi_o(\uparrow\Pi_1)$  долбяка, а профиль зубьев (направляющая) – двухэлементарным движением обката  $\Phi_n(B_2B_3)$ , состоящим из двух функционально связанных элементарных движений: вращения  $B_2$  долбяка и вращения  $B_3$  заготовки. На начальном этапе одновременно с указанными движениями заготовке (или долбяку) сообщается движение  $Vr(\Pi_4)$  радиального врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки долбяку сообщается движение  $Vc(\Pi_5)$  «отскока», предназначенное для отвода долбяка от заготовки при его возвратном ходе в движении  $\Phi_o(\uparrow\Pi_1)$  с целью устранения явления затирания, проявляющегося в виде скольжения зубьев долбяка о зубья профилируемого колеса.

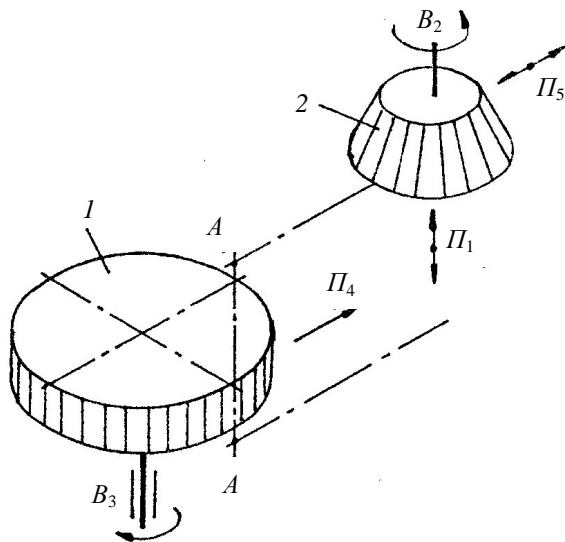


Рисунок 1 – Способ долбления прямозубых цилиндрических колес с радиальным врезанием

В приведенном примере способ формообразующей обработки характеризуется некоторой совокупностью приемов, т.е. целенаправленных действий (движений), совершаемых заготовкой и долбяком для достижения первообразной цели – получения прямозубого колеса внешнего зацепления. Наряду с приемами целенаправленных действий в качестве признаков способа выступают последовательность приемов и правила выполнения отдельных приемов – определенность установки заготовки относительно направления движения врезания и существенно меньшей скорости движения врезания и скорости обката (круговой подачи) по сравнению со скоростью резания. Таким образом, с позиций общей теории

систем пионерный способ обкатного зубодолбления – это законченный целостный объект реальной действительности. Его синергизм – существенное повышение производительности и кинематической точности прямозубых цилиндрических зубчатых колес [2].

Позже в фирме «Сайкс» (Великобритания), используя принцип независимости формообразующих движений, с целью долбления косозубых цилиндрических колес в схеме рассмотренного пионерного способа элементарное поступательно-возвратное движение  $\Phi_o(\uparrow\Pi_1)$  преобразовали в двухэлементарное возвратно-винтовое движение  $\Phi_o(\uparrow\Pi_1 \uparrow B_6)$ , где  $\uparrow B_6$  – дополнительное вращательно-возвратное движение долбяка. Полученный таким образом способ долбления косозубых цилиндрических колес с радиальным врезанием отличается от пионерного дополнительным элементом (движением  $\uparrow B_6$ ) и правилом его выполнения (функциональной связью с движением  $\uparrow\Pi_1$ ).

Способы долбления с радиальным врезанием используют также при обработке зубчатых колес внутреннего зацепления. В этом случае элементарные движения, образующие сложное движение обката, вращаются в одну и ту же сторону.

**Способ обкатного зубодолбления с касательным врезанием.** Этот способ, производный от пионерного способа обкатного зубодолбления, предложен в 70-е годы прошлого столетия [3]. При зубодолблении с касательным врезанием (рис. 2) заготовку 1 устанавливают на расстоянии  $h$  от плоскости движения врезания, равном половине диаметра делительной окружности долбяка 2. Затем долбяку и заготовке сообщают формообразующие и вспомогательные движения. Линия зуба (образующая) зубчатого колеса воспроизводится движением  $\Phi_o(\uparrow\Pi_1)$  долбяка, а профиль зубьев (направляющая) – двухэлементарным движением обката  $\Phi_n(B_2B_3)$ . На начальном этапе заготовке 1 сообщают также двухэлементарное движение врезания  $Vp(\Pi_4B_6)$ , воспроизводящее зубчатое зацепление. Это движение продолжают до тех пор, пока ось долбяка не переместится на линию  $A-A$ , соответствующую окончанию врезания. В этом положении движение врезания прекращают, и на втором этапе в течение одного оборота заготовки профилируют нарезаемое колесо движением обката. В течение всего цикла обработки заготовке сообщают движение  $Vc(\Pi_5)$  «отскока» синхронно с движением  $\Phi_o(\uparrow\Pi_1)$  долбяка.

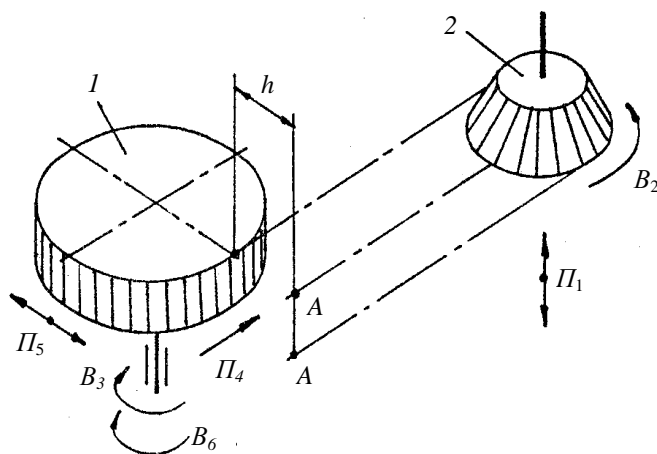


Рисунок 2 – Способ долбления прямозубых цилиндрических колес с касательным врезанием

Данный способ, признанный изобретением, сложнее пионерного, так как содержит дополнительный прием (дополнительное вращение  $B_6$  заготовки). Изменены также правила выполнения приемов – установка заготовки на вполне определенное расстояние от плоскости движения врезания и согласование элементарных движений, образующих сложное движение врезания. По утверждению автора этого способа, такое усложнение обеспечивает одинаковые условия резания на режущих кромках зубьев долбяка, что позволяет повысить его размерную стойкость. Однако это утверждение недостаточно корректно. Действительно, на этапе касательного врезания условия резания несколько изменяются, так как врезание воспроизводит зубчатое зацепление. На этапе профилирования условия резания для обоих видов врезания (касательного и радиального) одинаковы. Поэтому некоторые отличия условий резания на этапе врезания не могут дать существенного повышения периода размерной стойкости инструмента.

Для способа обкатного зубодолбления с радиальным врезанием путь врезания зависит только от модуля и практически равен высоте зуба нарезаемого колеса. При зубодолблении с касательным врезанием этот путь существенно возрастает как при увеличении числа зубьев нарезаемого колеса, так и при увеличении числа зубьев долбяка. Следовательно, при касательном врезании возрастает машинное время на этапе врезания, что в итоге снижает производительность зубонарезания. Вполне естественна следующая производная цель – уменьшение машинного времени врезания. Для достижения данной цели можно следующим образом изменить правила выполнения врезания. По сложившейся традиции врезание осуществляют одновременно с обкатом. Причем подачу врезания устанавливают 0,1...0,3 значения круговой подачи. Следовательно, процесс зубодолбления на этапе врезания осуществляется при суммарной подаче, векторное значение которой при касательном врезании составляет 1,1...1,3 значения круговой подачи. Считая, что суммарная подача на этапе врезания лимитирует технологическую надежность станка, можно уменьшить машинное время выполнения этого этапа посредством последовательного выполнения врезания и обката, установив значение подачи врезания, равное суммарной подаче, например, среднее ее

значение, составляющее 1,2 значения круговой подачи. При последовательном выполнении касательного врезания и профилирования в структуре соответствующего станка в момент прекращения движения врезания и включения движения профилирования в цепи обката происходит натяжение кинематических передач под воздействием силы резания. В итоге происходит круговое смещение долбяка относительно нарезаемого колеса на величину, пропорциональную суммарной круговой податливости передач, следствием чего является заужение (утонение по толщине) последнего нарезаемого зуба. Устранить это нежелательное при чистовой обработке явление можно следующим образом. Необходимо движение касательного врезания на протяжении  $2/3 \dots 3/4$  пути осуществлять с подачей, составляющей 1,2 значения круговой подачи. Затем на оставшемся участке пути врезания подачу врезания необходимо регрессивно уменьшать, а круговую подачу прогрессивно увеличивать так, что суммарная подача сохраняется постоянной. В итоге к моменту окончания касательного врезания круговая подача возрастает до заданного значения, а подача касательного врезания уменьшается до нулевого значения. Данное правило выполнения движений врезания и обката наиболее рационально использовать на зубодолбежных станках с ЧПУ.

Правило выполнения приема установки заготовки при касательном врезании создает условия для обработки одним долбяком двух заготовок на двух позициях как последовательно, так и параллельно. В этом случае некоторое усложнение структуры первообразного способа оправдывается повышением производительности. Соответствующие способы зубодолбления, в том числе признанные изобретениями, рассмотрены в монографии [4].

Специфической особенностью обкатного зубодолбления является прерывистый (дискретный) характер резания, так как срезание стружки происходит только при рабочем ходе долбяка в движении  $\uparrow P_1$  скорости резания. Движение обката, скорость которого определяется круговой подачей долбяка, в течение всего цикла обработки происходит непрерывно. Следовательно, оба формообразующих движения функционируют в качественно различном ритме, что неизбежно при каком-то значении круговой подачи и при принятой величине «отскока» долбяка на холостом ходу приводит к возникновению явления затирания.

Природа явления затирания объясняется следующим образом [5]. При обкате долбяка и заготовки очередной зуб долбяка, вступая в зону зацепления, профилирует впадину копированием и обкатом. На первом рабочем ходе долбяка в движении  $\uparrow P_1$  на заготовке копируется часть профиля зуба, а при последующих рабочих ходах копирование сопровождается обкатом. Причем по мере прохождения каждым зубом долбяка зоны резания протяженность копирующей части профиля зуба сначала возрастает от нуля до некоторого максимума, а затем убывает, приближаясь к нулю. Перенос зоны копирования по линии зуба осуществляется по винтовой линии, угол подъема которой равен углу между вектором скорости резания и вектором движения формообразования, определяемом как геометрическая сумма векторов скорости резания и круговой подачи. При холостом ходе в движении  $\uparrow P_1$  (деление по линии зуба нарезаемого колеса) долбяк контактирует боковыми задними поверхностями каждого зуба с материалом заготовки на локализованном участке, срезаемом при следующем рабочем ходе, т.е. возникает явление затирания. Это явление циклически повторяется на каждом зубе долбяка, вступающем в процесс долбления. Наиболее неблагоприятные условия резания каждым зубом соответствуют начальному этапу, где преобладает копированием и, следовательно, возможны наибольшие по величине натяги при затирании. На режущих кромках данному этапу соответствуют зоны более интенсивного износа по задним поверхностям входных боковых режущих кромок у вершин зубьев долбяка, чем у их ножек.

На первом этапе поиска технических решений, обеспечивающих устранение явления затирания, доминировала виртуальная идея «косого отскока». Наибольший интерес представляет способ зубодолбления, производный от пионерного, по которому долбяку сообщают дополнительный «круговой отскок» в сторону, противоположную вектору круговой подачи. В этом случае за счет сложения векторов радиального и кругового «отскоков» при холостом ходе воспроизводится «косой отскок». Такое решение, признанное изобретением [6], усложняет кинематическую подсистему пионерного способа. Этот способ используется в зубодолбежных станках фирмы «Тос Челаковице» (Чехия).

В работе [7] показано, что «косой отскок» не решает в целом задачу устранения явления затирания. Причем при однопроходном, наиболее распространенном, зубодолблении «косой отскок» переносит зону возникновения явления затирания на противоположную боковую режущую кромку зубьев долбяка. Поэтому представляются более рациональными решения, основанные на принципе приведения ритма движения обката  $\Phi_n(B_2B_3)$  к ритму движения скорости резания  $\Phi_o(\uparrow P_1)$ . Следовательно, можно на периоды холостого хода долбяка прекращать движение обката. Такой вариант, признанный изобретением [8], изменяет только функцию пионерного способа зубодолбления.

**Особенности срезания припуска при обкатном зубодолблении.** Основная масса припуска при зубодолблении срезается вершинными и входными режущими кромками зубьев долбяка [9]. Причем толщина стружек, срезаемых режущими кромками на окружностях выступов, приблизительно одинакова, а толщина стружек, срезаемых выходными режущими кромками, значительно меньше толщин стружек, срезаемых входными режущими кромками на одноименных окружностях. Таким образом, для зубо-

долбления характерны неодинаковость толщин стружек на различных режущих кромках зубьев долбяка и возрастание толщин стружек от основания к вершине зубьев долбяка. При малых круговых подачах, принятых при зубодолблении, выходная режущая кромка срезает тонкие стружки, соизмеримые с естественным радиусом закругления режущей кромки. С увеличением круговой подачи толщина стружек на различных участках режущих кромок зубьев долбяка возрастает пропорционально круговой подаче.

При прохождении каждым зубом долбяка зоны обработки прослеживаются три качественно различных периода срезания стружки [9; 10]:

- период, начинающийся с момента начала резания вершинной и входной режущими кромками до вступления в зону обработки выходной режущей кромки. Срезаемые стружки имеют *L*-образную форму;
- период резания вершинной, входной и выходной режущими кромками. Срезаемые стружки имеют *U*-образную форму;
- период выхода зуба долбяка из зоны резания. Срезаемые стружки имеют *L*-образную форму, постепенно переходящую в *I*-образную.

При зубодолблении по традиционной, пионерной схеме наиболее распространен тип *U*-образного схода стружки (рис. 3, *а*), при котором входная 1 и вершинная 2 режущие кромки срезают более толстые стружки, чем выходная режущая кромка 3 [9]. Вершинная стружка прижимает стружку, сходящую с выходной режущей кромки, к передней поверхности и затрудняет ее сход. Стружка, срезанная вершинной режущей кромкой, отклоняется от стружки, сходящей с входной режущей кромки, и подвергается высокой растягивающей нагрузке, что приводит к разрыву промежуточной зоны стружки между вершинной и входной режущими кромками зуба долбяка, после которого обе стружки сходят беспрепятственно и не вызывают высоких механических или температурных деформаций на границе между вершинной и входной режущими кромками. Тонкая стружка, срезанная выходной режущей кромкой зуба, также отделяется от толстой стружки, сходящей с вершинной режущей кромки. Эта стружка выдавливается толстыми стружками в зазор между боковой стороной зуба долбяка и обрабатываемой поверхностью, где она истирается на участке стыка вершинной и выходной режущих кромок. Здесь образуется лунка локального износа по передней поверхности. Расстояние от выходной режущей кромки до центра лунки зависит от круговой подачи. При ее увеличении это расстояние также увеличивается.

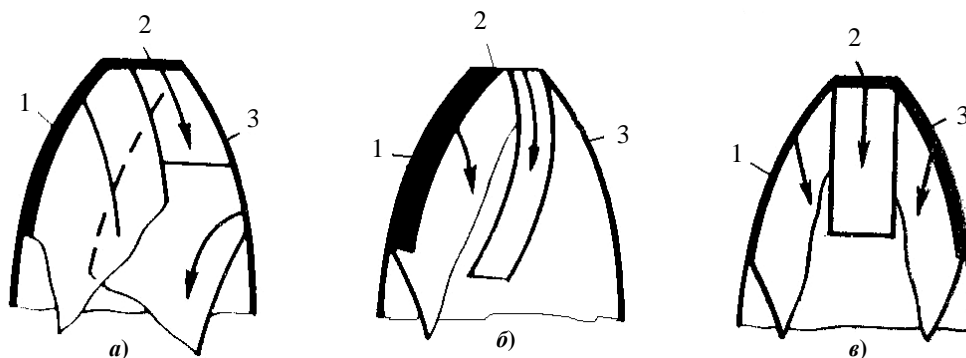


Рисунок 3 – Сход стружек при зубодолблении

При обкатном зубодолблении износ наблюдается по периметру всех режущих кромок. Причем его интенсивность нарастает от основания к вершинной режущей кромке. Однако лимитирует размерную стойкость долбяков лунка локального износа по передней поверхности у выходной режущей кромки. Данное явление представляет собой специфический парадокс процесса обкатного зубодолбления, так как оно возникает на участке, срезающем минимальные по толщине стружки. Постепенное увеличение лунки локального износа приводит к разрушению выходной режущей кромки по передней поверхности у вершин зубьев долбяка. Для снижения интенсивности развития лунки локального износа можно использовать технологический прием, заключающийся в изменении направления движения обката перед обработкой очередной заготовки. В этом случае лунки локального износа образуются симметрично на входной и выходной режущих кромках. Однако интенсивность их развития замедляется примерно в два раза.

Наряду с указанным технологическим приемом рассмотрим на основе анализа схода стружек еще два возможных пути существенного замедления лунки локального износа. Первый путь связан с такой модификацией классической схемы, которая обеспечит срезание вместо *U*-образной более простой *L*-образной стружки. Такой тип стружки, срезанной входной 1 и вершинной 2 режущими кромками, представлен на рисунке 3, *б*. Выходная режущая кромка в резании не участвует, *L*-образная стружка после разрыва промежуточной зоны между вершинной и входной режущими кромками зуба долбяка сходит беспрепятственно и не вызывает высоких деформаций на границе между этими режущими кромками.

Второй путь – создание условий резания, при которых толщина стружки, срезаемой входной и выходной режущими кромками, будет одинакова (рис. 3, в). В этом случае стружки, имеющие одинаковую толщину, вызывают равную взаимную деформацию и сходят в стыке между вершинной и боковыми режущими кромками в одинаковых условиях. Вследствие взаимной деформации передняя поверхность зубьев долбяка подвергается равномерной силовой и тепловой нагрузке. Образование зоны локализованного износа сдвигается во времени и одновременно происходит ее перераспределение на обе боковые режущие кромки. Таким образом, лунки локального износа на передней поверхности появляются в окрестностях вершинной режущей кромки у обеих боковых режущих кромок. Однако интенсивность их развития также замедляется примерно в два раза, что, соответственно, увеличивает период размерной стойкости долбяков.

**Многопроходное зубодолбление с увеличенным круговыми подачами.** При традиционном однопроходном зубодолблении нормальными долбяками создание условий для срезания  $L$ -образной стружки невозможно, а при двух-трехпроходном – практически неэффективно. Поэтому в области конструирования зубодолбежных станков ведущих станкостроительных фирм произошел переход от классического одно – трехпроходного зубодолбления к многопроходному при 6...10 проходах с увеличенными на порядок круговыми подачами до 3,5...4,5 мм/двойной ход долбяка на предварительных черновых и получистовых проходах. Такой режим при сохранении производительности традиционного зубодолбления с малыми круговыми подачами обеспечивает повышение периода размерной стойкости зуборезных долбяков. Объясняется это следующими обстоятельствами. С увеличением круговой подачи толщина стружки возрастает, одновременно уменьшается ее длина, т.е. происходит перераспределение параметров сечения стружки. При этом количество срезаемых стружек уменьшается примерно на порядок. Увеличение толщины стружек, срезаемых выходной режущей кромкой, обеспечивает более благоприятные условия их схода и, как следствие, лунку локального износа сдвигает к центру передней поверхности зуба. Интенсивность развития лунки локального износа заметно замедляется. Кроме того, каждый зуб долбяка, срезая существенно меньшее количество стружек, меньше нагревается. В результате возрастает термостойкость режущих кромок зубьев.

При многопроходном зубодолблении с увеличенными круговыми подачами можно создать условия для срезания на проходах как симметричной  $U$ -образной, так и  $L$ -образной стружки. Рассмотрим решение данной задачи, предложенное в [11]. При врезании перед очередным проходом долбяку сообщают угловое смещение, противоположное его круговой подаче, и одновременно измеряют момент силы резания. При достижении моментом силы резания нулевого значения, что соответствует одинаковой по толщине стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, угловое смещение долбяка прекращают. В итоге на проходе будет срезаться  $U$ -образная стружка, имеющая одинаковую толщину на боковых режущих кромках. Из описания принципа функционирования рассматриваемого технического решения, признанного изобретением, следует, что этот способ содержит подсистему стабилизации момента силы резания, обеспечивающую повышение периода размерной стойкости долбяка посредством создания условий для срезания симметричной  $U$ -образной стружки на каждом проходе, кроме первого. Источником информации и энергии для подсистемы стабилизации силового воздействия является среда резания. В свою очередь, эта подсистема является источником информации для структуры врезания кинематической подсистемы способа многопроходного зубодолбления [12].

При зубодолблении с  $L$ -образной стружкой на втором и последующих, кроме последнего, проходах при каждом последующем врезании угловое смещение долбяка изменяют на противоположное. Одновременно измеряют момент силы резания. При достижении моментом силы резания максимального значения, что соответствует максимальной по толщине стружки, срезаемой одной из боковых режущих кромок, угловое смещение долбяка прекращают. В итоге на проходе будет срезаться  $L$ -образная стружка. На последнем, чистовом, проходе срезание припуска должно осуществляться в виде  $U$ -образной стружки.

При большом количестве проходов возрастает машинное время врезания, выполняемое перед каждым проходом. Этот недостаток устранен в способе зубодолбления [13], используемом в зубодолбежных станках с ЧПУ фирмы «Лоренц» (ФРГ) [14; 15], по которому на предварительных проходах врезание осуществляют непрерывно по спирали. В приведенных источниках правило выполнения подач, воспроизводящих спиральное врезание, не рассматривается. Поэтому подробно рассмотрим вывод этого правила.

При постоянных значениях подачи радиального врезания и круговой подачи на этапе предварительных проходов при непрерывном врезании долбяка 2 относительно заготовки 1 действительная траектория врезания имеет вид архимедовой спирали 3 (рис. 4). Результирующая (спиральная) подача врезания долбяка равна геометрической сумме составляющих ее подач:

$$S_0 = \sqrt{S_K^2 + S_P^2},$$

где  $S_0$  – действительная (спиральная) подача врезания, мм/двойной ход долбяка;  $S_K$  – круговая подача, мм/двойной ход долбяка;  $S_P$  – радиальная подача врезания, мм/двойной ход долбяка.

Круговая подача является нормируемой величиной, устанавливаемой при назначении режимов резания. Тогда радиальную подачу можно определить как часть круговой подачи, используя принцип пропорциональности перемещений:

$$S_p = S_k \frac{h}{L},$$

где  $h$  – величина радиального перемещения долбяка, принимаемая на этапе черновых проходов, мм;  $L$  – длина архимедовой спирали между точками  $A$  и  $B$ , по которой перемещается долбяк относительно заготовки, мм.

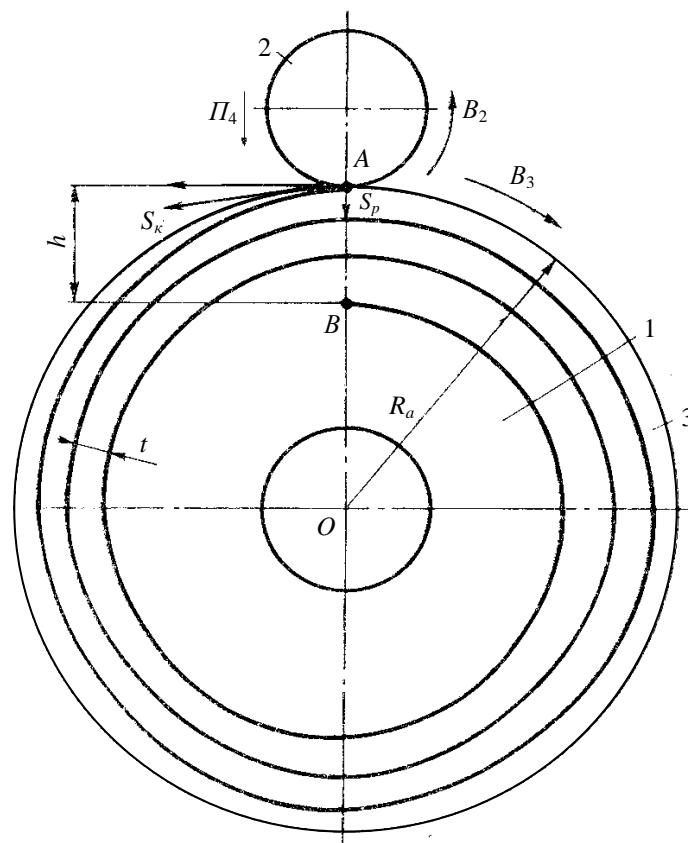


Рисунок 4 – Траектория движения долбяка при врезании по спирали

Известно, что длина архимедовой спирали [14], начиная от полюса, определяется по формуле:

$$l = \frac{a}{2} \left( \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \operatorname{Arsh} \varphi \right),$$

где  $l$  – длина архимедовой спирали, мм;  $a$  – параметр архимедовой спирали, мм;  $\varphi$  – угол поворота радиус-вектора точки в полярных координатах, рад.

Следовательно, длину архимедовой спирали, по которой перемещается долбяк на этапе врезания, можно определить как разность длин спиралей: полюс  $O$  – точка  $A$ , полюс  $O$  – точка  $B$ . После элементарных преобразований получим

$$L = \frac{a}{2} \left[ \left( \varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2} \right) + \left( \operatorname{Arsh} \varphi_2 - \operatorname{Arsh} \varphi_1 \right) \right].$$

Здесь  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы поворота заготовки в движении обката по длине архимедовой спирали на участках соответственно от полюса до точки  $B$  и от полюса до точки  $A$ .

Углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  определим из выражений:

$$\varphi_1 = 2\pi \frac{R_a - h}{a}; \quad \varphi_2 = 2\pi \frac{R_a}{a},$$

где  $R_a$  – радиус окружности выступов обрабатываемого колеса, мм.

Параметр  $a$  и шаг  $t$  архимедовой спирали связаны следующим соотношением:

$$T = 2\pi a.$$

Шаг архимедовой спирали при зубодолблении можно выразить через количество проходов  $k$ :

$$t = h / k.$$

Следовательно,

$$a = h / 2\pi k.$$

В выражении для определения  $L$  второе слагаемое, представляющее разность обратных гиперболических синусов в пределах приемлемого числа предварительных проходов, не превышает 0,1 мм. Поэтому этим слагаемым можно пренебречь при практических расчетах. После подстановки значения  $L$  в выражение для  $S_p$  окончательно получим:

$$S_p = \frac{2S_k h}{a \left( \varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2} \right)}.$$

Особенность кинематической подсистемы рассматриваемого способа зубодолбления – сложная двухэлементарная группа врезания  $Vp(B_2\Pi_4)$ , элементарное движение  $B_2$  которой входит также в структуру группы движения профилирования (обката)  $\Phi_n(B_2B_3)$ . Функционируют эти группы последовательно по следующему правилу: многопроходное спиральное врезание на предварительных проходах, затем профилирование на чистовом проходе.

**Синергетическая модель целенаправленного развития открытого множества обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес.** Рассмотренный пионерный способ обкатного зубодолбления с радиальным врезанием и производные от него первообразные способы с касательным врезанием и со спиральным врезанием на первом уровне системного описания их кинематической подсистемы различаются только видом врезания. С позиций синергетики данная триада на поле ветвящихся виртуальных путей эволюции открытого множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес [17] в точке бифуркации образует аттрактор (коридор целенаправленного развития) способов обкатного зубодолбления. Анализ патентных и других библиографических источников показал, что этот аттрактор содержит значительный массив способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес, аналогами которых являются способы названной триады. Следовательно, данный аттрактор можно рассматривать как поле эволюции открытого множества способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес, состоящее из трех подмножеств, различающихся видом движения врезания (рис. 5).

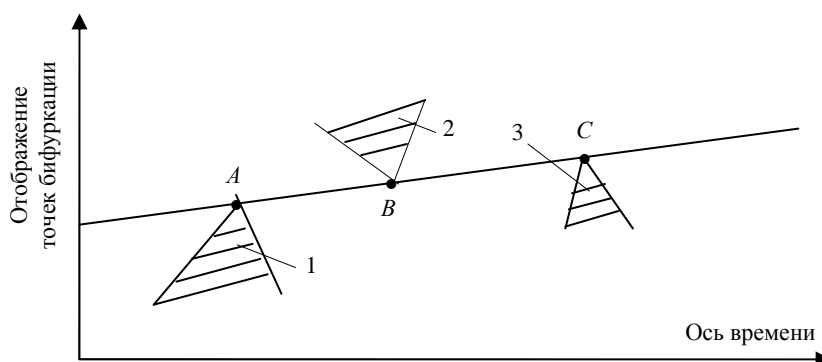


Рисунок 5 – Поле ветвящихся путей целенаправленного развития подмножеств способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес

В точке бифуркации  $A$  аттрактор  $1$  пионерного способа обкатного зубодолбления содержит значительный массив траекторий эволюции подмножества способов обкатного зубодолбления с радиальным врезанием прямозубых и косозубых колес, зубчатых венцов колес внутреннего зацепления, зубчатых секторов, колес с наклонными по делительной окружности зубьями. Характерной особенностью данного массива являются траектории, основанные в основном на изменении последовательности и правил выполнения приемов как пионерного, так и производных от него способов. В точке бифуркации  $B$  аттрактор  $2$  первообразного способа обкатного зубодолбления с касательным врезанием содержит массив эволюции подмножества способов зубодолбления цилиндрических колес внешнего зацепления. Однако наиболее рациональная область использования – долбление одним долбяком параллельно и последовательно двух

зубчатых колес, зубчатых колес при их планетарном движении относительно долбяка и при совмещении зубодолбления с роторным перемещением пар долбяк – нарезаемое колесо. В точке бифуркации  $S$  аттрактор  $Z$  первообразного способа обкатного зубодолбления со спиральным врезанием содержит незначительный массив подмножества способов обкатного зубодолбления. Объясняется это тем, что эти способы осуществимы в основном в мехатронных обрабатывающих системах, т.е. на зубодолбежных станках с ЧПУ.

**Заключение.** С позиций системологии рассмотрены пионерный способ обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес с радиальным врезанием и ряд производных от него способов с касательным и спиральным врезанием. На этой основе предложена модель целенаправленной эволюции обкатного зубодолбления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гир-Шепер, Ф. Зубодолбежный станок / Ф. Гир-Шепер. – М., 1914.
2. Голембиевский, А.И. Синергетическая модель эволюции множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 17–22.
3. Способ нарезания цилиндрических колес: пат. 475761 (СССР), МКИ В 23F 5/12 / М. Тиксье // Открытия. Изобретения. – 1975. – № 24.
4. Голембиевский, А.И. Системный анализ процесса зубодолбления / А.И. Голембиевский. – Минск: Наука и техника, 1993.
5. Матюшин, В.М. Зубодолбление / В.М. Матюшин. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. и судостроит. лит., 1953.
6. Zařizení k přidavnému pootáčení nástroje odvalovacích obráběček na ozubeni: Patent 123494 (CSR), MKU МКИ В 23F 5/12.
7. Verschleiss untersuchungen beim Walzstosstn von Geradverzahnungen / Н. Opitz u. a. // Bericht des Landes Nordrhein-Westfalen. – 1974. – № 2401. – S. 64.
8. Способ долбления цилиндрических зубчатых колес: авт. свид. 698732 (СССР) МКИ В 23F 5/12 / А.И. Голембиевский // Открытия. Изобретения. 1979. – № 43.
9. Кениг, Г. Стружкообразование и износ инструмента при зубодолблении / Г. Кениг, К. Бузакис // Экспресс-информация, режущие инструменты. – М.: ВИНТИ, 1989.
10. Vaida, A. Studium formej aschiilor la mortezarea rotilor dintate cu cu-roata, in vederea determinarii fortelor de achiere / A. Vaida, G. Bejnaru // Buletinul universitatii din Brasov. – 1979. – A 21. – S. 41–48.
11. Способ долбления зубчатых колес: пат. 1641534 (СССР) МКИ В 23F 5/12 / А.И. Голембиевский // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 14.
12. Голембиевский, А.И. Анализ способов формообразующей обработки с позиций общей теории систем / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 139–146.
13. Способ обработки зубчатых колес: пат. 1763112 (СССР) МКИ В 23F 5/12 / А.И. Голембиевский // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 35.
14. Каталог зубодолбежных станков фирмы «Lorenz». – Ettlingen, 1988.
15. Walzstossen in Eterpen // Maschine. – 1991. – Vol. 45, № 6. – S. 75–78.
16. Заманский, М.С. Введение в современную алгебру и анализ / М.С. Заманский. – М.: Наука, 1974.
17. Голембиевский, А.И. Синергетическая модель эволюции множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 17–22.

Поступила 08.12.2015

#### PURPOSEFUL EVOLUTION OF SET WAYS TO ROUNDING GEAR SLOTING OF CYLINDRICAL GEARS

*A. GOLEMBIEVSKI*

*With the system positions pioneering method of rounding gear-slotting of cylindrical gears with radial incision and its derivatives primitives ways with tangential incision and with a spiral incision are described. Specific characteristics of rounding gear-slotting are analyzed – the phenomenon of chip formation erase and features – and ways of minimizing the impact of it phenomena on the dimensional stability of gear cutting cutters are discussed. From the position of synergy that on the branching paths of evolution of an open set ways processing of cylindrical gears, rounding gear-slotting forms attractor (corridor) focused subsets of flow forming methods of gear-slotting differing views of plunging movement are showed.*

**Keywords:** rounding gear-slotting, evolution, cylindrical gears, dimensional resistance, maximization.