УДК 621.9.04

В.А. Настасенко, канд. техн. наук, доц.
Херсонская государственная морская академия (Украина)
Тел./Факс: +38 (050) 8079199; *E-mail: Nastasenko2004@front.ru*

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИПЕРБОЛОИДНЫХ ЧЕРВЯКОВ С МАЛЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ЗАХОДОВ

Работа относится к области технологии производства червяков, в частности – гиперболоидных. Предложены наиболее простые технологические процессы получения гиперболоидных основных червяков и проведен анализ точности их изготовления, доказывающий возможность замены всех малозаходных цилиндрических червяков – гиперболоидними, при минимальных изменениях технологических процессов.
***Ключевые слова**: гиперболоидные червяки и червячные передачи, технологии и точность изготовления гиперболоидных червяков*

Введение. Гиперболоидные червячные имеют существенные преимущества по сравнению с цилиндрическими, в частности – сохраняют линейчатую форму начальной прямой исходного зубчатого контура, что обеспечивает высокую точность профиля при любом количестве заходов, а за счет криволинейной формы наружной поверхности – обеспечивают увеличение количества входящих в зацепление витков, что повышает их нагрузочную способность [1-3].

Однако технология производства гиперболоидных червячных передач пока еще разработана недостаточно полно, поэтому решение данной проблемы является важной и актуальной задачей, для их более широкого применения, что составляет главную цель и научную новизну выполняемой работы.

Анализ известных и выбор предпочтительной технологии производства гиперболоидных червяков.

Применительно к однополостным гиперболоидным червякам, схема исходного варианта обработки [4], реализуемого в осевой плоскости, показана на рис. 1.

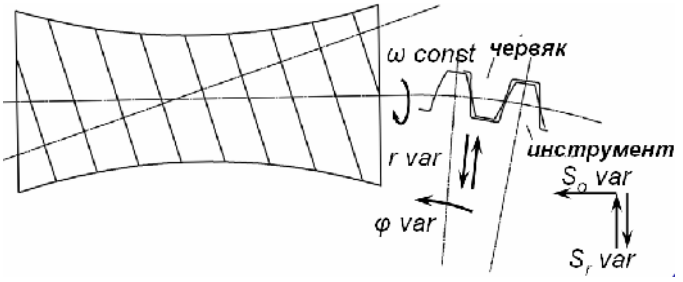

Рис. 1. Схема формирования гиперболоидного червяка при осевой обработке

По исходному варианту обработку гиперболоидного червяка выполняют при 1-м равномерном вращении и сложении 4-х движений переменной величины, связанных с движением центра кривизны гиперболы: 1) продольной подачи, 2) поперечной подачи, 3) величины вылета R_i , 4) величины угла φ_i разворота инструмента в осевой плоскости. При многопроходной обработке к ним добавляется дискретная подача на глубину резания за 1 проход, с движением отвода и подвода инструмента, а при многозаходной

– дискретный поворот заготовки червяка на новый заход. При обработке фрезами или шлифовальными кругами – добавляется их вращение, как главное движение резания.

Обработка по данному варианту требует:

а) точной настройки резца на размер начального диаметра червяка с разворотом резца в направлении нормали к крайней точке гиперболы и установки его на исходный угол разворота по нормали к этой точке с исходной величиной вылета, равной радиусу кривизны гиперболы в этой точке и по 2-м координатам текущего центра ее кривизны;

б) сложных видов движений для обработки – равномерного вращения червяка и согласованных с ним и шагом его витков в осевом сечении (из расчета смещения на 1 шаг витка за 1 оборот червяка), неравномерных изменений угла поворота и величины текущего вылета резца, зависящих от параметров кривизны гиперболы;

в) выполнения 2-х неравномерных подач суппорта – продольной и радиальной, формирующих траекторию движения точки текущего центра кривизны гиперболы.

Это требует выполнения обработки, или на кинематически сложных станках, или на станках с ЧПУ, программируемым по 8 движениям, либо создания кинематических приспособлений, еще более сложных, чем для обработки глобоидных червяков.

Другим недостатком обработки гиперболоидных червяков в осевой плоскости, является несовпадение профиля их витков и профиля инструмента, как между собой, так и с профилем исходной зубчатой рейки, что усложняет контроль профиля червяка, а также изготовление и контроль профиля нарезающего витки инструмента. В работе [4] был принят формообразующий инструмент, полученный на базе сопрягаемых с червяком зубчатых колес, с конкретным и единственным для данной червячной пары количеством зубьев, что исключает универсальность, как применяемого инструмента, так и технологического процесса обработки.

Устраняет указанные недостатки изготовление гиперболоидных червяков по предложенному в патенте РФ способу [5], с наклонной подачей инструмента по нормали к витку червяка (рис.2), которая исключает зависимость от количества зубьев сопрягаемого колеса. Количество заходов червяка при этом не ограничивается.

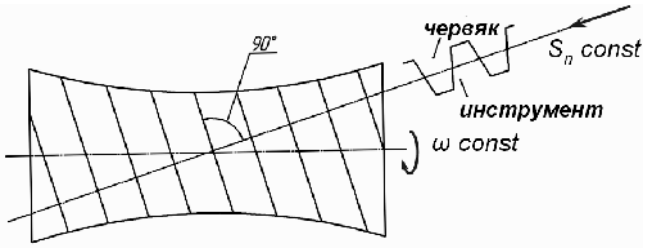

Рис. 2. Схема формирования гиперболоидного червяка при наклонной подаче

Реализация этого способа возможна при исходной настройке резца на размер делительного диаметра червяка и выполнения не 5-ти, а лишь 2-х основных движений: 1) равномерного вращения червяка, 2) согласованной с ним равномерной наклонной подачи инструмента, из расчета смещения его на 1 шаг по нормали к виткам за 1 оборот червяка. Все вспомогательные движения – врезания, быстрого подвода и отвода, а также для многопроходной и многозаходной обработки червяка, остаются одинаковыми с исходным вариантом.

Дополнительным преимуществом данного способа является полное совпадение профиля витков червяка и инструмента с профилем зубьев рейки в плоскости рабочей подачи, что упрощает их изготовление и контроль.

Однако для реализации предложенного способа [5] необходима модернизации токарных, гидрокопировальных и резьбофрезерных станков, недостатком которой является относительная сложность ее выполнения, а в ряде случаев – уменьшение размеров зоны для обработки, жесткости и точности технологической системы.

Для устранения этих недостатков предложен новый способ обработки [6]. Его выбор обусловлен тем, что у современных высокоточных цилиндрических червячных передач фактическое количество заходов не превышает 4-х, что ограничивает угол наклона витков к оси червяка, величиной $\omega_\omega \le 12°$. В этом случае возможна обработка гиперболоидных червяков по существующим технологиям обработки цилиндрических червяков, при равномерном вращении ω червяка и прямолинейной осевой подаче s_z режущего инструмента, выполненным по нормали к его витку, с двумя существенными отличиями: – смещением заднего центра станка на высоту $\pm h_ц$ (1), а установленного на суппорте станка перед червяком инструмента – на высоту $\pm h_u$ (2), вниз – при обработке правозаходных червяков, вверх – при обработке левозаходных червяков (рис. 3.а,б):

$$\pm h_ц = l_ц \sin(\pm\omega_\omega) \text{ (мм)}, \quad (1)$$

$$\pm h_u = l_u \sin(\pm\omega_\omega) \text{ (мм)}. \quad (2)$$

где $l_ц$ – расстояние между центрами шариковых вершин переднего и заднего центров станка, мм,

l_u – расстояние между центром шариковой вершины заднего центра станка и поперечной осью симметрии гиперболы, мм,

ω_ω – угол наклона винтовой линии основного червяка к его продольной оси.

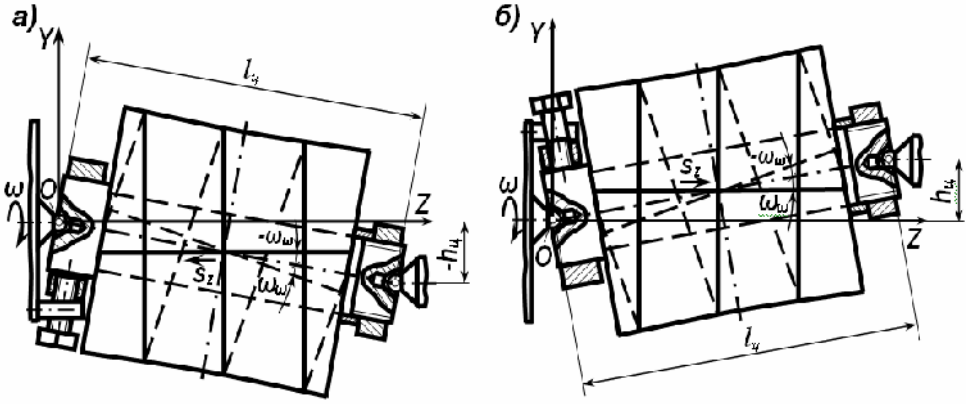

Рис. 3. Схемы чистовой обработки гиперболоидных червяков при переднем расположении суппорта с режущим инструментом и смешении заднего центра станка: а) правозаходных, б) левозаходных

Возможны также другие варианты смещения заднего центра и инструмента [7].

Для данных схем обработки (рис. 3) проблематичным является смещение заднего центра станка. Если при переднем расположении суппорта с режущим инструментом, для левозаходных червяков оно возможно более простым путем – смещением заднего центра вверх (например, за счет подкладок под заднюю бабку), то для обработки правозаходных червяков необходимо, либо заднее положение суппорта, что усложняет станок и управление им, либо применение специальных приспособлений для сдвига заднего центра, ряд конструкций которых предложен в заявке на патент [6].

Однако установка червяков в центрах с поводковым патроном целесообразна при чистовой обработке, поэтому для 1 – 4-х заходных червяков предлагается черновую

обработку всех их поверхностей и профиля витков выполнять по базовым технологиям изготовления цилиндрических червяков, а гиперболоидную поверхность и профиль – нарезать при чистовой обработке. Поэтому для реализации такого варианта обработки требуется провести анализ точности и возникающих при этом погрешностей.

Анализ точности нового способа обработки гиперболоидных червяков.

Главной особенностью данной работы является выбор технологий, ведущих к минимальному и эффективному переходу от базовых процессов и оборудования для производства цилиндрических червяков, к процессам и оборудованию для производства гиперболоидных червяков, реализация которых не требует больших затрат времени, труда и капитальных вложений на их выполнение. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет предлагаемый выше способ [6], поскольку смещение заднего центра на величину $\pm h_ц$ и инструмента на величину $\pm h_u$ не представляет больших технических трудностей. Кроме того, для шлифовальных станков, имеющих возможность разворота стола в горизонтальной плоскости до $3 – 4^o$, такая установка не потребует применения специальных приспособлений при обработке однозаходных червяков. При смещениях $\pm h_ц$ и $\pm h_u$ наружная гиперболоидная поверхность и связанный с ней профиль зубьев получаются автоматически.

Следует также учесть, что данная технология обработки исключает архимедовы ZA червяки (с прямолинейным профилем в осевом сечении); и эвольвентные ZI (с прямолинейным профилем витка касательным к винтовой линии, лежащей на соосной цилиндрической поверхности). Воспроизведение архимедового основного червяка (в осевом сечении которого формируется архимедова спираль), невозможно при неосевом движении инструмента. Поскольку при гиперболидной форме начальной поверхности червяка сдвиг $\pm h_u$ инструмента от осевой плоскости червяка, неизбежен при винтовой обработке с шагом t_z и подачей s_z по нормали к витку, то это приведет к отклонению от архимедовой спирали. Формирование эвольвентного червяка ZI требует иного, чем $\pm h_u$, смещения инструмента, а это приведет к искажениям гиперболоидной поверхности, что нецелесообразно по условию точности, однако для окончательного вывода об отказе от эвольвентных червяков, требуются дополнительные исследования.

При сдвиге $\pm h_u$ и прямолинейной форме передней поверхности резца будут получены ZH_1, ZH_2, ZH_3 гиперболоидные основные червяки – аналоги конволютых ZN_1, ZN_3, ZN_3 цилиндрических червяков. Искажения их профиля неизбежно появятся за счет винтовой формы витков червяка, но величина искажений будет в 5-10 раз меньше, чем у цилиндрических конволютых червяков и будет минимальной у ZH_3 червяков. Однако эти отклонения могут быть полностью исключены при винтовой форме передней поверхности резцов или дисковых фрез, или торцовых лезвийных режущих инструментов, что исключает различия в производстве гиперболоидных червяков, как при установке инструмента по нормали к витку (ZH_1), так и по впадине витка (ZH_2), или по нормали к боковым поверхностям витков (ZH_3).

При смещении заднего центра на заданную величину $\pm h_ц$, зависящую от угла $\pm \omega_\omega$ наклона витков и расстояния $l_ц$ между центрами (рис. 3, 4), которое, в свою очередь, зависит от точности изготовления шариковых вершин центров станка и центровых отверстий червяка или его оправки, требуется постоянный контроль величин $l_ц$ и $h_ц$ при обработке червяков особо высокой точности.

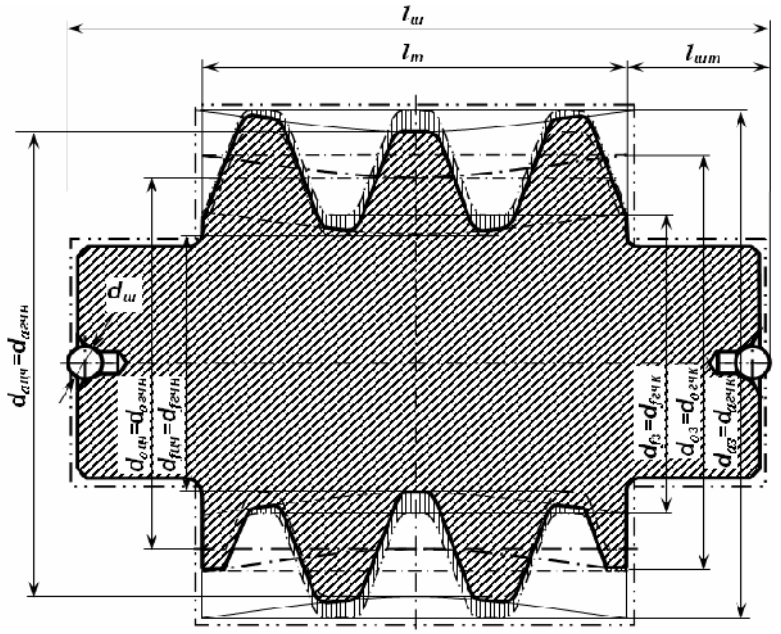

Рис. 4. Схема формирования гиперболоидного червяка на базе заготовки цилиндрического, вертикально заштрихован припуск на обработку профиля витков

Для контроля величин $l_ц$ и $h_ц$, перед установкой червяка в центрах станка в оба центровых отверстия червяка или его оправки вводят по шарику, диаметр $d_ш$ которых равен диаметру шариковых вершин переднего и заднего центров станка, а затем измеряют расстояние $l_ш$ между выступающими из центровых отверстий поверхностями шариков, после чего величину $l_ц$ определяют по зависимости (3):

$$l_ц = l_ш - d_ш, \text{ (мм)} \tag{3}$$

При смещении инструмента на заданную величину $\pm h_u$, зависящую от угла $\pm\omega_\omega$ наклона витков и расстояния l_u между центром шариковой вершины заднего центра станка и поперечной осью симметрии гиперболы, необходимо: 1) ввести в правое центровое отверстие червяка или его оправки шарик, диаметр $d_ш$ которого равен диаметру шариковой вершины заднего центра станка: 2) выполнить измерение: расстояния $l_{шт}$ между поверхностью шарика, выступающей из центрового отверстия и базовым торцом витков червяка; 3) выполнить измерение расстояния l_m между торцами витков червяка; 4) выполнить расчет l_u по зависимости (4):

$$l_u = l_{шт} + \frac{1}{2}\left(l_m - d_ш\right), \text{ (мм)} \tag{4}$$

При отсутствии коррекции смещения инструмента, максимальные погрешности гиперболоидной поверхности со знаком (+) будут иметь червяки с минимальной величиной $l_ц$ и максимальными величинами $l_{шт}$ и l_m, а также с максимальной величиной $l_ц$ и минимальными величинами $l_{шт}$ и l_m, что требует ужесточения допусков на эти размеры. Частично компенсировать их величину может назначение допусков со знаком (+) на глубину центровых отверстий и со знаком (–) для величин $l_{шт}$ и l_m.

При черновой обработке червяков по технологии цилиндрических, а чистовой – со смещением центров, характер трансформации профиля и припуск на его обработку показан на рис. 4, где $d_{оцч}$, $d_{ацч}$, $d_{fцч}$ – соответственно диаметры: делительной окружности, окружности выступов и впадин базового цилиндрического червяка, равные начальным

диаметрам окружностей гиперболоидного червяка: делительной $d_{огчн}$, выступов $d_{агчн}$, впадин $d_{fгчн}$; а также $d_{оз}$, $d_{аз}$, $d_{fз}$ – соответственно: диаметры делительной окружности, окружности выступов и впадин заготовки, равные конечным диаметрам окружностей гиперболоидного червяка: делительной $d_{огчк}$, выступов $d_{агчк}$, впадин $d_{fгчк}$.

Величина трансформации диметров базового, промежуточного цилиндрического и гиперболоидного червяков может быть определена по зависимостям:

$$d_{оцч} = d_{огчн} = z_ч m \text{ (мм)}, \quad (5)$$

где m – модуль зубьев, мм,

$z_ч$ – условное количество зубьев червяка,

$$d_{ацч} = d_{агчн} = d_{оцч} + 2m \text{ (мм)}, \quad (6)$$

$$d_{fцч} = d_{fгчн} = d_{оцч} - 2{,}5m \text{ (мм)}, \quad (7)$$

$$d_{оз} = d_{огчк} = \sqrt{\left(d_{огч}{}^2 + \left(\frac{l_m}{2} tg\, \omega_\omega \right)^2 \right)} \text{ (мм)}, \quad (8)$$

ω_ω – угол подъема винтовой линии основного червяка на начальном диаметре:

$$\omega_{ов} = arctg\left(\frac{n\pi m}{\pi m z_ч} \right) = arctg\left(\frac{n}{z_ч} \right) \text{(рад)}, \quad (9)$$

здесь n – количество заходов червяка,

$$d_{аз} = d_{агчк} = d_{огчк} + 2m \text{ (мм)}, \quad (10)$$

$$d_{fз} = d_{fгчк} = d_{огчк} - 2{,}5m \text{ (мм)}. \quad (11)$$

Максимальное увеличение диаметра поверхности выступов у гиперболоидного червяка, которое становится припуском на его обработку:

$$\Delta_{ad} = d_{агч} - d_{ацч} \text{ (мм)}. \quad (12)$$

Максимальное увеличение диаметра поверхности впадин у гиперболоидного червяка, которое становится припуском на его обработку:

$$\Delta_{fd} = \Delta_{ad} \text{ (мм)}. \quad (13)$$

Максимальное увеличение толщины профиля витка гиперболоидного червяка, которое становится припуском на его обработку:

$$\Delta_{ар} = \frac{\Delta_{ad}}{2} \sin \alpha_o \text{ (мм)}. \quad (14)$$

где α_o – угол профиля зубьев рейки и витка червяка на начальном диаметре, рад.

Для базовых 1, 2, 3 и 4-х заходных червяков, в диапазоне их делительных диаметров $d_{оцч} = (16\ldots20)m$ и длин винтовой части $l_m = 6\pi m$, результаты расчета основных параметров заготовок и припусков на их обработку приведены в таблице 1.

Приведенное в таблице увеличение наружного диаметра Δ_{ad} гиперболоидного червяка равно увеличению его внутреннего диаметра Δ_{fd}, половина данной величины составляет припуск на сторону при обработке его по этим диаметрам, а величина Δ_{ad} уменьшается от среднего сечения к правому и левому торцам винтовой части червяка. Увеличение толщины витков, или припуск на их сторону $\Delta_{ор}$, также уменьшается от среднего сечения к торцам винтовой части червяка, однако он не учитывает искажений от 5 до 10 мкм на 1 заход, от реальной трансформации профиля витков цилиндрических червяков-заготовок, что требует проведения дополнительных исследований. Величины Δ_{ad} и $\Delta_{ор}$ растут при увеличении модуля и количества заходов червяка, и уменьшаются

при увеличении условного количества зубьев червяка $z_ч$, что позволяет варьировать этими показателями для получения лучшего распределения припусков.

Таблица1. Основные параметры гиперболоидных червяков и припусков на их обработку

Начальные диаметры окружностей $d_{огчн}$, мм, $d_{агчн}$, мм, $d_{fгчн}$, мм	Угол подъема витков 1-4х заходных червяков ω_ω, град..	Конечный диаметр делитель-ной окружности$d_{огчк}$, мм	Конечный диаметр окружности выступов $d_{агчк}$, мм	Конечный диаметр окружности впадин $d_{fгчк}$, мм	Увеличение наружного диаметра max Δ_{ad}, мкм	Увеличение толщины витков на сторону, max Δ_{op}, мкм
m = 3 мм, длина винтовой части червяка l_m = 56 мм, количество заходов $i_ч$ = 1 – 4.						
48; 54; 40,5.	3°34’35"	48,032	54,032	40,532	32	5,5
	7°07’30"	48,127	54,127	40,627	127	21,7
	10°37’11"	48,286	54,286	40,786	286	48,9
	14°02’10"	48,507	54,507	41,007	507	86,7
54; 60; 46,5.	3°10’47"	54,022	60,022	46,522	22	3,8
	6°20’24"	54,090	60,090	46,590	90	15,4
	9°27’24"	54,201	60,201	46,701	201	34,4
	12°31’44"	54,357	66,357	46,857	357	61,1
60; 66; 52,5.	2°51’45"	60,016	66,016	52,516	16	2,7
	5°42’38"	60,065	66,065	52,565	65	11,1
	8°31’51"	60,147	66,147	52,647	147	25,1
	11°18’36"	60,261	66,261	52,761	261	44,6
m = 5 мм, длина винтовой части червяка l_m = 94 мм, количество заходов $i_ч$ = 1 – 4.						
80; 90; 67,5.	3°34’35"	80,054	90,054	67,554	54	9,2
	7°07’30"	80,215	90,215	67,715	215	36,8
	10°37’11"	80,484	90,484	67,984	484	82,8
	14°02’10"	80,858	90,858	68,358	858	146,7
90; 100; 77,5.	3°10’47"	90,038	100,038	77,538	38	6,5
	6°20’24"	90,152	100,152	77,652	152	26,0
	9°27’24"	90,340	100,340	77,840	340	58,1
	12°31’44"	90,604	100,604	78,104	604	103,3
100; 110; 87,5.	2°51’45"	100,028	110,028	87,528	28	4,8
	5°42’38"	100,110	110,110	87,610	110	18,8
	8°31’51"	100,248	110,248	87,748	248	42,4
	11°18’36"	100,441	110,441	87,941	441	75,4

Учитывая переустановку червяка на станок со смещенными центрами, припуски также должны дополнительно учитывать погрешности от базирования, переустановки и закрепления, а также комплекс погрешностей настройки и движения инструмента.

Общие выводы по работе

1. Наиболее простой технологией изготовления гиперболоидных червяков 1…4-х заходов является предложенная в заявке на патент [6], с обработкой заготовок в виде исходных цилиндрических червяков и последующей обработкой с наклоном их оси при смещении заднего центра станка и режущего инструмента. Полученные результаты расчетов подтверждают принципиальную возможность применения такой технологии.

2. Технологии изготовления гиперболоидных червяков с наклонной подачей инструмента по патенту РФ [5], не имеют ограничений по количеству заходов, однако

требуют сложной модернизации оборудования, поэтому могут быть рекомендованы после апробаций червяков, изготовленных по технологии со смещением заднего центра.

Список литературы:

1. Настасенко В.А. Новые технологические процессы для обработки гиперболоидных червячных передач /Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. Вип. 40. с. 176–185.

2. Настасенко В.О. Гіперболоїдні зубчасті передачі та інструменти, нові варіанти виготовлення і можливості використання /Машиностроение и техносфера XXI века. XVIII Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе. – Донецк: ДонНТУ, 2011. –с. 240 – 247.

3. Настасенко В.О. Удосконалення виробництва гіперболоїдних зубчастих передач та черв'ячних зуборізних інструментів //Надежность инструмента и оптимизация технических систем. Сборник научных работ – Краматорськ: ДДМА, Випуск 30, 2012. - с.226-232.

4. Витренко А.Н., Витренко В.А., Зуй Б.С., Кириченко И.А. Повышение качества изготовления зубьев при обработке многозаходным инструментом. / Современные проблемы машиностроения и технический прогресс. Тез. докл. междунар. научно-техн. конф. –Донецк: ДонГТУ, 1996. -с. 41-42.

5. Патент Российской Федерации на изобретение № 2200262, МПК B23 F 21/16. Червячная передача, способ ее изготовления, оборудование и инструмент для его осуществления. Автор изобретения В,А. Настасенко. Заявка № 98116838/28 от 08.09.98. //БИ 2003. № 7 от 10.03.03.

6. Заявка на патент на изобретение Российской Федерации № 2012138947 от 11.09.2012. Способы обработки гиперболоидных червяков и червячных зуборезных инструментов и устройства для их реализации. Авт. Настасенко В.А.

7. Настасенко В.А. Основные типы гиперболоидных червяков и способы их производства //Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. Вип. 44. - с.181–188.

8. Настасенко В.А. Сравнение точности конволютых цилиндрических и гиперболоидных червяков //Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. –Херсон, ХДМА, 2012. - с. 116-121.

V.A. Nastasenko

ANALYSIS OF EXACTNESS AND TECHNOLOGICAL MAKING OF HYPERBOLOID WORMS WITH THE FEW OF ENTRIES

Work behaves to the area of technology of production of worms, in particular – hyperboloid. The most simple technological processes of receipt of hyperboloid basic worms are offered and the analysis of exactness of their making, proving possibility of replacement all little entries of cylindrical worms, is conducted – hyperboloid, at the minimum changes of technological processes.

***Keywords**: hyperboloid worms and worm-gears, technologies and exactness of making of hyperboloid worms.*

В.О. Настасенко

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ГІПЕРБОЛОЇДНИХ ЧЕРВ'ЯКІВ З МАЛОЮ КІЛЬКІСТЮ ЗАХОДІВ

Робота відноситься до області технології виробництва черв'яків, зокрема – гіперболоїдних. Запропоновані найбільш прості технологічні процеси виробництва гіперболоїдних черв'яків і проведений аналіз точності їх виготовлення, що доводить можливість заміни всіх малозаходних циліндрових черв'яків – гіперболоїдними, при мінімальних змінах технологічних процесів.

***Ключові слова:** гіперболоїдні черв'яки і черв'ячні передачі, технології і точність виготовлення гіперболоїдних черв'яків.*

Надійшла до редколегії 17.06.2013 р.