

УДК 621.833.383

А.Л. ХУДОЛЕЙ, канд. техн. наук, доц.

заведующий лабораторией высокоточной обработки поверхности

E-mail: khudoley@hmti.ac.by

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

О.А. БАРАН

старший научный сотрудник лаборатории сельхозмашиноведения

E-mail: baran_olga@yahoo.com

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 03.05.2018.

СОСТАВНЫЕ ЧЕРВЯЧНЫЕ КОЛЕСА: ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РЕМОНТА

Предложен общий подход к проектированию составных червячных колес, обеспечивающий снижение потребления цветных металлов, повышение ресурса за счет применения различных материалов, наиболее соответствующих условиям эксплуатации в трибосопряжениях, и улучшающий ремонтпригодность использованием сменных элементов, закрепленных в/на ступице. Выполнена классификация червячных колес по их конструктивному исполнению. Разработаны новые ремонтпригодные конструкции составных червячных колес с применением биметаллических элементов «сталь — бронза»: венец, гайка и подшипник скольжения. Они позволяют восстанавливать работоспособность изношенных поверхностей, применять различные материалы и технологии для изготовления колеса и многократно использовать ступицу. Изложены основные требования к проектированию таких конструкций и материалам. Предложен алгоритм расчета составных червячных колес со сменными биметаллическими элементами, основанный на использовании двух- и трехслойных цилиндрических моделей, который позволяет снизить толщину рабочего слоя для поверхностей трения. Трехслойная модель представлена полым цилиндром ступицы и запрессованным цилиндром биметаллического элемента с эквивалентным диаметром для расчета венца или гайки. Выполнен анализ технологий изготовления червячных колес диаметром до 6300 мм. Составлена номенклатура червячных колес для шестишпиндельных токарных станков. Рассмотрены особенности ремонта червячного колеса диаметром 425 мм центробежным методом. Показано, что разработанные конструкции дополнительно обеспечивают необходимый натяг после механической обработки поверхностей сопряжения ступицы за счет изготовления сменных элементов с новыми ремонтными посадочными размерами. Выявлено, что использование составных червячных колес позволяет уменьшить коэффициент применяемости цветных сплавов с 1,0 (для цельнобронзовых) до 0,1–0,25 в зависимости от габаритных размеров.

Ключевые слова: *составное червячное колесо, биметаллический сменный элемент, технология изготовления и ремонта червячных колес*

Введение. Составные деревянные колеса известны уже несколько тысячелетий, а металлические червячные колеса применяются с конца XIX века [1]. В настоящее время также ведутся работы, позволяющие уменьшить расход цветных металлов и улучшить условия работы червячной передачи [2–6]. Однако большинство червячных колес по-прежнему изготавливается цельнометаллическими.

Традиционно для производства червячных колес используют цветные сплавы с низким коэффициентом трения, например бронзы БрОФ10-1 и БрАЖ9-4. Максимальный экономический эффект сокращения расхода цветных сплавов достигается для крупногабаритных колес. Диаметры червячных колес могут быть до 6300 мм [7]. На практике к крупногабаритным

уже относятся серийно выпускаемые передачи с межосевым расстоянием от 100 до 500 мм [8], что соответствует наружному диаметру колеса 120 мм и более.

Реже встречаются неразъемные биметаллические червячные колеса и разъемные составные колеса с цельнометаллическим венцом, который крепится к ступице одним из способов: при помощи прессовой посадки, болтового соединения, штифтами [6, 9]. Изготовление червячных колес в биметаллическом исполнении позволяет снизить потребление цветных металлов за счет изготовления ступицы из чугуна или стали. Целесообразно развить такой подход и более широко использовать чугун и сталь при изготовлении колес за счет применения разъемной конструкции с биметаллическими элементами.

На практике разные поверхности червячного колеса изнашиваются в различной степени, поскольку эксплуатационные нагрузки и условия трения отличны друг от друга, в то время как для всех поверхностей цельнометаллических колес используется одинаковый материал. Составные конструкции позволяют применять антифрикционные материалы различных составов, наиболее соответствующие условиям эксплуатации, что приводит к снижению износа поверхностей и обеспечивает возможность выполнения условия равнопрочности, уменьшая неоправданный расход бронзы. В этой связи необходимо разработать подход, при котором основная часть составной конструкции червячного колеса — ступица — должна выполняться из недорогостоящих конструкционных материалов (низкоуглеродистая сталь или чугун) с более высокими прочностными свойствами и меньшим весом и служить базовой деталью, к которой крепятся сменные элементы.

Целью настоящей работы является формирование обобщенного подхода к проектированию составных червячных колес с возможностью замены и восстановления изнашиваемых элементов при многократном использовании ступицы колеса, описать технологии их изготовления и особенности ремонта таких конструкций.

Общий подход к проектированию составных червячных колес. На основе анализа червячные колеса по признаку конструктивного исполнения можно разделить на два типа (рисунок 1): неподвижные (*a* — с цилиндрической поверхностью под посадку и венцом, выполненным на ступице, *b* — со шпоночным пазом), подвижные (*в* — с резьбовым профилем, *г* — с резьбовым профилем и поверхностью скольжения) относительно вала колеса. Такая классификация позволяет разработать рациональные конструкции составных червячных колес отдельно для каждого из типа деталей.

Наиболее сложная конструкция колеса представлена на рисунке 1 *г*. Эта конструкция с венцом, гайкой и подшипником скольжения может использоваться, например, для привода ходового винта. Авторами [10] предложено изготавливать такое колесо составным, включающим три биметаллических элемента: венец колеса, подшипник скольжения и гайку ступицы. В частном случае составное червячное колесо может содержать не все указанные сменные элементы. Составная конструкция предполагает образование рабочих поверхностей за счет сменных биметаллических элементов, соединенных со ступицей, что позволяет использовать различные материалы для изготовления колеса: ступицу колеса можно получать из чугуна, а биметаллические сменные элементы — из стали и бронзы или из чугуна и бронзы. При этом достигается экономия бронзы и цветных сплавов, улучшается ремонтпригодность, повышается срок службы червячных редукторов.

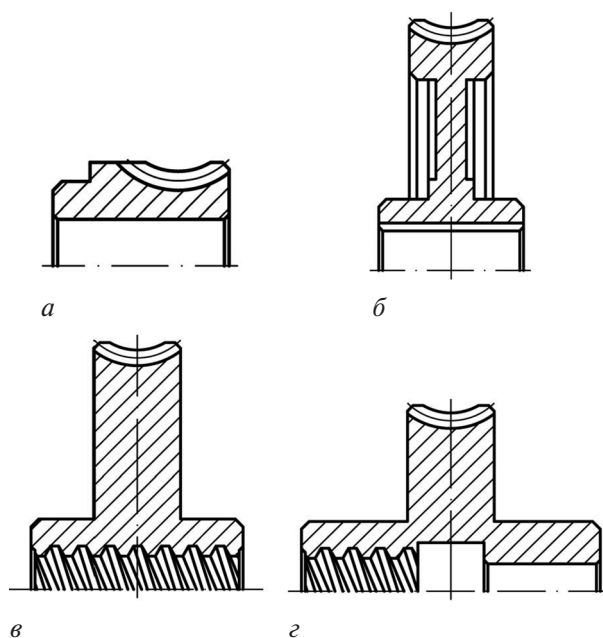


Рисунок 1 — Конструкции цельнометаллических червячных колес с различными вариантами исполнения ступицы:
a — с цилиндрической поверхностью под посадку;
b — со шпоночным пазом; *в* — с резьбовым профилем;
г — с резьбовым профилем и подшипником скольжения

Применение составной конструкции также дает возможность сформировать поверхности из материалов, обладающих сочетанием различных свойств: высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами, — что позволяет получать новые свойства конструкций, например изменение динамических характеристик.

Следует отметить, что проектирование составной конструкции колеса неразрывно связано с технологическими возможностями ее получения, выполнения монтажных и ремонтных работ для требуемых условий эксплуатации.

Особенности конструкции. В ходе эксплуатации износ рабочих поверхностей колеса происходит неравномерно для разных элементов (гайка, подшипник скольжения, венец) в зависимости от условий смазки, рабочей температуры, типа материалов и других факторов. При выборе конструкции необходимо анализировать условия эксплуатации червячной передачи в целом и учитывать скорость разгона, наличие ударов, величину нагрузки, общую длительность работы в сутки, реверсивность, а также количество включений редуктора в час.

Для формирования составной конструкции червячного колеса со сменными биметаллическими элементами (рисунок 2) по отдельности проектируют и изготавливают элементы с покрытиями и цельнометаллическую ступицу. Сменные элементы состоят из несущей стальной основы и нанесенного антифрикционного слоя, выполняемого, как правило, из бронзы или многокомпонентной латуни.

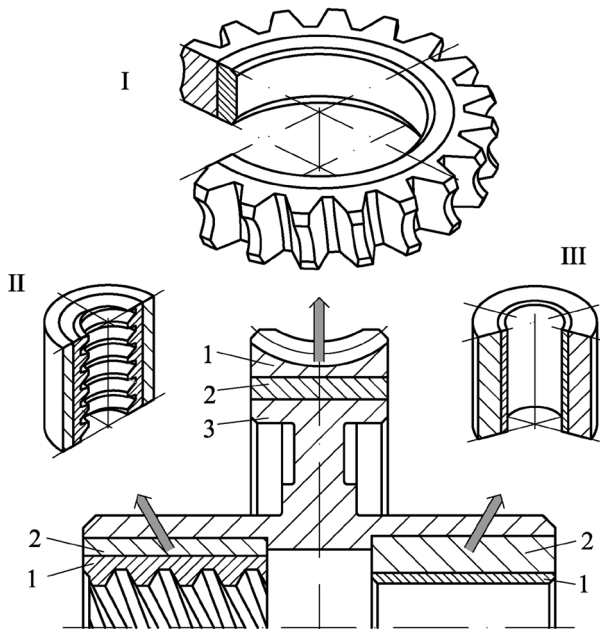


Рисунок 2 — Составное червячное колесо со сменными биметаллическими элементами (I — венец; II — гайка; III — подшипник скольжения): 1 — антифрикционный слой; 2 — стальная основа; 3 — материал ступицы (чугун или сталь)

Биметаллический венец I (см. рисунок 2) червячного колеса должен иметь прочную связь между слоями. Червячный профиль нарезается по наружному антифрикционному покрытию и крепится к ступице прессовой посадкой, или бандажированием, или болтовым соединением. Зубчатый профиль составного колеса выполняется с такими же параметрами зацепления (модулем, числом зубьев, числом заходов червяка и т. д.), как и для цельнобронзового, при этом первоначальные геометрические параметры профиля определяются на основе расчета контактных напряжений с последующей проверкой по изгибным напряжениям. Гайка II и подшипник скольжения III (см. рисунок 2) изготавливаются также в виде биметаллических элементов: «стальная основа — внутреннее антифрикционное покрытие».

Кроме экономии цветных металлов, использование несущего стального слоя позволяет в большинстве случаев повысить прочность прессовой посадки в зоне сопряжения со ступицей за счет соединения материалов с более высокими пределами прочности, заменяя соединения «чугун — бронза» или «сталь — бронза» на «чугун — сталь» или «сталь — сталь».

Требования к материалам. Выбор материала зубчатого профиля червячного колеса преимущественно определяется скоростями скольжения $v_{ск}$ в зацеплении с червяком. Для изготовления зубчатого профиля, сопрягаемого со шлифованными и полированными червяками твердостью $HRC \geq 45$ применяются чугуны ($v_{ск} = 1-2$ м/с), латуни ($v_{ск} = 2-5$ м/с), безоловянные бронзы ($v_{ск} = 5-8$ м/с), оловянные бронзы ($v_{ск} > 8$ м/с). При использовании червяков твердостью $HRC < 45$,

окончательно обработанных резцом, требования к материалам зубчатого профиля колеса повышаются: чугуны ($v_{ск} < 1$ м/с), латуни ($v_{ск} = 1-2$ м/с), безоловянные бронзы ($v_{ск} = 2-5$ м/с), оловянные бронзы ($v_{ск} = 5-8$ м/с) [11]. Кроме того, необходимо учитывать также условия работы передачи: червячные колеса, эксплуатируемые при больших мощностях и/или скоростях скольжения $v_{ск} > 2$ м/с, выполняются из бронз БрОФ 10-1 и БрОНФ 10-1-1. При скорости скольжения менее 2 м/с и значительных нагрузках используются безоловянистые бронзы БрАЖ 9-4, БрАЖН 11-3-4 и БрАЖН 10-4-4. В сверхкрупногабаритных и ответственных передачах червячные колеса выполняются из серого чугуна марок СЧ 15-32, СЧ 18-36, СЧ 21-40. При повышенных требованиях к бесшумности работы червячные колеса и сменные элементы могут изготавливаться из неметаллических материалов, например из текстолита или капролона.

Выбор материала гайки и подшипника скольжения также выполняется по скорости скольжения с учетом материала вала колеса. Для несущего слоя биметаллических элементов используется, как правило, низкоуглеродистая сталь 10.

Основы проектирования. Определяющим моментом расчета биметаллических элементов (толщин слоев) является выполнение условия прочности с заданным коэффициентом запаса. Прочность биметаллических сменных элементов определяется совместным действием нескольких факторов, основными из которых являются воспринимаемый крутящий момент, эксплуатационный нагрев, центробежные силы и посадка с натягом биметаллических элементов в/на ступицу. Расчет выполняется в соответствии с IV теорией прочности по эквивалентным напряжениям. При расчете биметаллического венца дополнительно учитываются напряжения от передаваемого момента, возникающие вследствие действия сил в зацеплении.

Основы расчета на прочность биметаллического венца червячного колеса, при котором колесо рассматривается в виде трехслойной модели, приведены в [12]. Дальнейшее развитие методика проектного расчета биметаллического венца получила в [13], где также рассмотрены вопросы определения требуемой прочности сцепления антифрикционного слоя с основой венца и минимально допустимой толщины антифрикционного слоя, показан пример расчета биметаллического венца для заданных геометрических и эксплуатационных параметров. В свою очередь, биметаллический венец болтовой конструкции можно рассчитать исходя из условия прочности двухслойного полого цилиндра эквивалентного диаметра, на который действуют крутящий момент, центробежные силы и температурные напряжения, возникающие из-за разности

коэффициентов линейного расширения антифрикционного слоя и стали [14].

Таким образом, расчет составного червячного колеса сводится к рассмотрению двух- и трехслойных цилиндрических конструкций и определению эквивалентных напряжений от действия эксплуатационных нагрузок. На практике трехслойная модель может быть представлена полым однослойным цилиндром (ступица) и запрессованным двухслойным цилиндром (биметаллический элемент) с эквивалентным диаметром для венца I или гайки II (см. рисунок 2). Двухслойная модель используется при расчетах биметаллического венца болтовой конструкции или цельнометаллических сменных элементов, запрессованных в/на ступицу. В общем случае проектирование составного червячного колеса с биметаллическими элементами осуществляется в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.

Расчетные зависимости [12–14] используются для определения эквивалентных напряжений в слоях двух- и трехслойных моделей, вычисления

прочности сцепления антифрикционного слоя с учетом эксплуатационных нагрузок и формирования на стадии проектирования необходимого запаса прочности слоев. Таким образом, из условия равнопрочности составной конструкции находится минимальная толщина слоев сменных элементов и необходимая прочность сцепления слоев с основой, далее по этим значениям осуществляется выбор технологий для получения биметаллических элементов.

Проведенный анализ показал, что применение биметаллических венцов диаметром 200–500 мм позволяет снизить толщину рабочего слоя в 1,4–1,6 раза по сравнению с цельнобронзовыми венцами при сохранении эксплуатационных свойств червячного колеса.

Технологии изготовления. Ступица и сменные элементы составного колеса (см. рисунок 2) изготавливаются независимо друг от друга, поверхности их сопряжения обрабатываются до 6–8 класса точности [15–16]. При получении венца используют стальную основу с нанесенным наружным антифрикционным слоем, в котором на следующем этапе нарезают червячный профиль. Биметаллическую гайку и подшипник скольжения изготавливают из стальной трубы с нанесением антифрикционного слоя на ее внутреннюю поверхность. Для гайки в слое нарезается резьбовой профиль. Выбор методов и режимов нанесения слоев на элементы или ступицу колеса определяется требуемыми прочностными и эксплуатационными свойствами слоя.

В настоящее время наиболее детально разработаны технологии получения цельнометаллического венца, крепление которого к ступице выполняется в виде бандажированной, болтовой или биметаллической конструкции [4, 17]. Для изготовления составной конструкции колеса с биметаллическими элементами могут быть использованы электрошлаковый переплав, литье в кокиль, литье в землю, центробежное литье, центробежный индукционный метод и другие технологии [18–20]. На рисунке 4 показана гистограмма применяемости методов изготовления составных червячных колес для их различных наружных диаметров (D).

Если при эксплуатации поверхность, сопряженная с валом колеса, практически не изнашивается, то ступицу целесообразно выполнять цельнометаллической. Получение антифрикционных слоев на внутренних и наружных поверхностях можно осуществлять двумя путями: нанесением слоев непосредственно на поверхности ступицы наплавкой, напылением или другими методами и запрессовкой биметаллических подшипников скольжения, гаек или венцов. При умеренном износе оправдано выполнять наплавку при восстановлении деталей либо допускается использовать сварную биметаллическую ступицу. В условиях



Рисунок 3 — Алгоритм расчета составного червячного колеса со сменными биметаллическими элементами

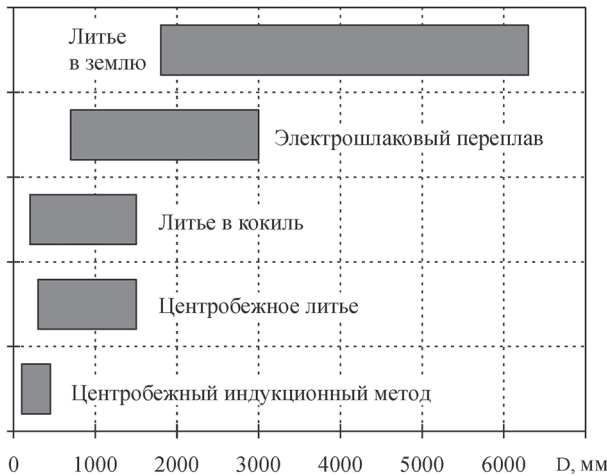


Рисунок 4 — Методы изготовления составных червячных колес

быстрого изнашивания целесообразно применять сменные биметаллические элементы с возможностью их оперативной замены при изнашивании.

В работах [21–24] приведены некоторые аспекты конструкций и технологических схем для получения составных конструкций червячных колес центробежным индукционным методом с возможностью нанесения слоев разных составов одновременно на несколько поверхностей. Указанный метод может быть использован для получения антифрикционных слоев толщиной до 50 мм как при изготовлении новых колес, так и в ремонтном производстве без применения специального термонагревательного оборудования и дорогостоящей оснастки [25].

На рисунке 5 показаны биметаллические венцы составных червячных колес с габаритными размерами $D = 425$ мм, $d = 260$ мм, $l = 75$ мм, модулем зацепления $m = 8$ мм, числом зубьев $z_2 = 50$ (БрАЖ 9-4 — Сталь 10) для шестишпиндельного токарного станка 1Б290-6, полученные центробежным индукционным методом. Соединение изготовленных венцов со ступицей колеса осуществляется прессовой посадкой с натягом.



Рисунок 5 — Биметаллические венцы составных червячных колес с оснасткой для их изготовления: 1 — зубчатый профиль (бронза); 2 — основа (сталь); 3 — оснастка

В ряде случаев использование методов литья снижает количество легирующих элементов, что ухудшает физико-механические свойства трибоповерхностей колеса [26]. В отличие от литья, методом электрошлакового переплава можно получить улучшенные свойства поверхностного слоя, например для крупногабаритных зубчатых колес трансмиссий карьерных самосвалов БЕЛАЗ особо большой грузоподъемности [26].

Составные конструкции червячных колес позволяют снизить коэффициент применяемости цветных сплавов, который в соответствии с ГОСТ 27782-88 [27] характеризует степень использования данного материала в изделии по отношению к общей массе конструкции изделий, от 1 (для цельнометаллических) до 0,1–0,25 (для составных). Кроме того, изготовление составной конструкции колеса дополнительно уменьшает вес колеса за счет использования других материалов (чугун или сталь) с меньшей плотностью и тем самым снижает нагруженность редуктора в целом.

Особенности ремонта. При ремонте составных червячных колес может использоваться три основных подхода. Первый заключается в том, что ступица восстановленного колеса изготовлена из ремонтируемого колеса, а изношенные поверхности компенсированы сменными элементами. При втором подходе изготавливается новая ступица из чугуна или стали, а поверхности сопряжения выполняются из переплавленного антифрикционного материала изношенного колеса. Третий — при котором все элементы составного червячного колеса изготавливаются новыми.

Одной из областей широкого применения крупногабаритных червячных колес является станкостроение. В станках необходимо передавать значительные крутящие моменты с обеспечением больших передаточных отношений и плавности работы, а также обеспечить высокую геометрическую и кинематическую точность. Номенклатура червячных колес, используемых в шестишпиндельных токарных станках, приведена в таблице.

Рассмотрим особенности ремонта на примере червячного колеса шестишпиндельного токарного станка 1Б290-6. На рисунке 6 показано крупногабаритное составное червячное колесо (с наружным диаметром 425 мм, модулем зацепления $m = 8$ мм, числом зубьев $z_2 = 50$) с резьбовым профилем в ступице. Такое колесо, кроме передачи движения между перекрещивающимися валами, обеспечивает осевое перемещение вала колеса по резьбовой поверхности. В данном случае на стальную ступицу (Сталь 10) центробежным литьем нанесен слой бронзы БрАЖ 9-4 (венец) и отдельно изготовлен цельнометаллический полый цилиндр из бронзы БрАЖ 9-4 (гайка). После запрессовки сменного элемента произведена нарезка резьбы в нем, затем сформирован зубчатый профиль венца.

Таблица — Номенклатура червячных колес шестишпиндельных токарных полуавтоматов и автоматов

Модель станка	Червячное колесо					Число заходов червяка z_1
	Количество	№ позиции на кинематической схеме	Модуль m , мм	Число зубьев z_2	Материал	
1А240-6	2	20	6	42	БрАЖ 9-4	1
		51	3,5	55	БрАЖ 9-4	1
1Б240-6	2	25	6	42	БрА9ЖЗЛ	1
		41	2	110	БрА9ЖЗЛ	1
1Б265-6	3	13	6	24	БрАЖ 9-4	3
		18	8	40	БрАЖ 9-4	1
		31	2	110	БрАЖ 9-4	1
1Б290-6	2	—	6	30	БрОЦС5-5-5	3
		—	8	50	БрАЖ9-4	1

Как ранее указывалось, для обеспечения работоспособности составного червячного колеса важно создать требуемый натяг в соединениях сменных элементов — ступице колеса.

Известно, что прочность соединений с натягом зависит от способа их сборки: механический, термический или гидропрессовый [28–30]. Чтобы уменьшить повреждение сопрягаемых поверхностей, сборку прессовых соединений лучше осуществлять тепловым методом или гидрораспором, так как прочность сопряжения при тепловой сборке в 1,84–4,15 раза выше по сравнению с механической запрессовкой [28]. Однако при сборке составного колеса следует учитывать условия ремонтного производства: наличие необходимого оборудования, размеры соединения, что особенно

важно для крупногабаритных червячных колес, и ряд других факторов. Наиболее часто для повышения производительности и снижения стоимости технологического процесса сборку элементов составного колеса осуществляют обычной механической запрессовкой.

В условиях ремонтного производства также следует учитывать коэффициент сменяемости элементов колеса. В [28] показано, что после третьей сборки-разборки конического соединения гидропрессовым способом прочность соединения снижается на 12% по сравнению с первой сборкой из-за появления рисков, а, следовательно, уменьшается контактное давление и, соответственно, натяг в соединении. Очевидно, что повреждение поверхностей сопряжения в той или иной мере характерно для любого метода сборки [31]. Поэтому после третьей сборки-разборки в условиях ремонтного производства возникает необходимость механической обработки поверхностей сопряжений ступицы и изготовления сменных биметаллических элементов с новыми ремонтными размерами.

Традиционно растачивание отверстия охватывающей детали приводит к существенному снижению прочности прессового соединения [29], поэтому ремонт таких соединений нежелательный. Применение составной конструкции колеса делает возможной механическую обработку сопрягаемых поверхностей ступицы. Для восстановления требуемой величины натяга прессовых соединений диаметр посадочной поверхности сменного элемента компенсируется на величину припусков механической обработки. Если необходимо часто менять венец (более трех раз), то лучше перейти к болтовой конструкции колеса. Использование сменных биметаллических элементов с новыми размерами позволяет значительно улучшить экономическую эффективность ремонта.

Составные червячные колеса со сменными биметаллическими элементами конструктивно

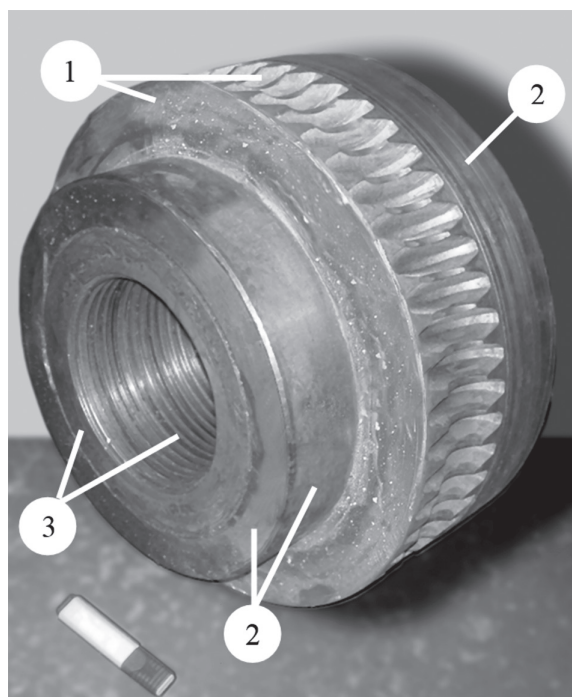


Рисунок 6 — Составное червячное колесо: 1 — венец (бронза); 2 — ступица (сталь); 3 — гайка (бронза)

позволяют заменять изношенные поверхности и многократно использовать корпусную основу. В этой связи при расчете и сравнении экономической эффективности от применения составных конструкций целесообразно определять коэффициент сменяемости, который характеризует экономичность изготовления и эксплуатации конструкции червячного колеса в целом [25]. Если для цельно-бронзового колеса коэффициент сменяемости указывал на частоту замены всего колеса в редукторе, то при переходе к составной конструкции со сменными элементами каждый элемент (ступица, венец, подшипник скольжения, гайка), в свою очередь, имеет собственный коэффициент сменяемости.

Заключение. Предложено при проектировании составных червячных колес использовать биметаллические сменные элементы, позволяющие снизить потребление цветных металлов, повысить ресурс червячной передачи путем применения рационального сочетания материалов трибосопряжений колеса, а также улучшить показатели ремонтпригодности. Червячные колеса разделены на два типа: подвижные и неподвижные относительно вала колеса, что позволило разработать новые ремонтпригодные конструкции составных червячных колес с биметаллическими элементами «сталь — бронза»: венец, гайка, подшипник скольжения. Определены особенности конструкций составных червячных колес, сформированы требования к материалам и проектированию. Приведен алгоритм расчета составных червячных колес с биметаллическими элементами, который основан на применении моделей двух- и трехслойных полых цилиндров.

Показано, что для изготовления составных червячных колес могут быть использованы методы электрошлакового переплава, литье в кокиль, литье в землю, центробежное литье, центробежный индукционный метод. При этом выбор метода изготовления лимитируется главным образом наружным диаметром червячного колеса.

На примере червячного колеса с резьбовым профилем в ступице для шестишпиндельного токарного станка 1Б290-6 рассмотрены особенности изготовления и ремонта составных конструкций. Отмечено, что прочность прессовых соединений при повторной запрессовке зависит от способа сборки (механический, термический или гидропрессовый) и существенно снижается после третьего использования. Показано, что предложенные ресурсосберегающие конструкции колес позволяют выполнять механическую обработку посадочных поверхностей ступицы и в дальнейшем обеспечивать необходимый натяг в сопряжениях со ступицей за счет изготовления сменных элементов с новыми ремонтными посадочными размерами.

Расширена номенклатура составных червячных колес, которая позволяет в ряде случаев увеличить область их применения и уменьшить ко-

эффициент применяемости антифрикционных материалов от 1 (для цельнометаллических) до 0,1–0,25 (для составных).

Список литературы

1. Gear-Wheel: pat. US 458984. — Publ. date: 01.09.1891. — 3 p.
2. Решетов, Д.И. Состояние и тенденции развития деталей машин / Д.И. Решетов // Вестн. машиностроения. — 2000. — № 10. — С. 11–15.
3. Составное зубчатое колесо: пат. ВУ 139, МКИ6 F16H 55/14. / Л.П. Кашицин, А.Л. Худолей, И.А. Сосновский, С.Е. Клименко. — Оpubл. 30.06.2000.
4. Пашкевич, М.Ф. Червячные передачи качения / М.Ф. Пашкевич, Н.И. Рогачевский, С.Н. Рогачевский. — Могилев: БРУ, 2005. — 137 с.
5. Скойбеда, А.Т. Передаточные механизмы на основе составных зубчатых колес / А.Т. Скойбеда, А.М. Даньков. — Минск: БГПА, 2000. — 96 с.
6. Червячные передачи: общие сведения, расчеты, динамика и надежность / В. Благодарный [и др.]. — Барановичи: РИО БарГУ, 2014. — 271 с.
7. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи червячные цилиндрические. Допуски: ГОСТ 3675-81. — Введ. 01.01.82. (с отменой ГОСТ 3675-56). — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 61 с.
8. Редукторы, мотор-редукторы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://reductor.com.ua/reductors/3>. — Дата доступа: 06.04.2018.
9. Кузьмин, А.В. Расчеты деталей машин: справ. пособие / А.В. Кузьмин, И.М. Чернин, Б.С. Козинцов. — Минск: Выш. шк., 1986. — 400 с.
10. Составное зубчатое колесо с составной ступицей: пат. ВУ 4714, МКИ6 F16H 55/00. / А.Л. Худолей, О.А. Баран. — Оpubл. 30.08.09.
11. Карнаух, С.Г. Детали машин: конспект лекций / С.Г. Карнаух. — Краматорск: ДГМА, 2002. — 212 с.
12. Худолей, А.Л. Методика расчета на прочность биметаллического обода червячного колеса / А.Л. Худолей, О.А. Баран, А.М. Гоман // Математические модели и алгоритмы для имитации физических процессов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Таганрог, 11–14 сент. 2006 г. — Таганрог, 2006. — Т. 1. — С. 116–119.
13. Худолей, А.Л. Проектный расчет биметаллического венца составного червячного колеса / А.Л. Худолей, О.А. Баран, А.М. Гоман // Вес. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2007. — №3. — С. 60–68.
14. Баран, О.А. Расчет биметаллического венца составного червячного колеса болтовой конструкции / О.А. Баран // Механика — 2011: сб. науч. тр. Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике: в 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2011. — Т. II. — С. 185–189.
15. Сандлер, А.И. Производство червячных передач / А.И. Сандлер, С.А. Лагутин, А.В. Верховский. — М.: Машиностроение, 2008. — 272 с.
16. Dudas, Illes. The Theory and practice of Worm Gear Drives / Illes Dudas. — London: Penton Press, 2000. — 314 p.
17. Васильков, Д.В. Электромеханические приводы металлообрабатывающих станков. Расчет и проектирование: учеб. / Д.В. Васильков, В.Л. Вейц, А.Г. Схиртладзе. — Санкт-Петербург: Политехника, 2010. — 759 с.
18. Худолей, А. Современные тенденции в проектировании и изготовлении червячных передач / А. Худолей // Гидродинамическая теория смазки — 120 лет: тр. Междунар. науч. симпозиума, Орел, 18–20 мая 2006 г.: в 2 т. / Орловский гос. техн. ун-т; редкол.: В.А. Голенков [и др.]. — М.: Машиностроение—1. Орел: ОрелГТУ, 2006. — Т. 2. — С. 196–209.
19. Электрофизические методы получения покрытий из металлических порошков / Н.Н. Дорожкин [и др.]. — Рига: Зинатне, 1985. — 131 с.
20. Получение биметаллических заготовок червячных колес методом электрошлакового переплава / Е.И. Марукович [и др.] // Литейное производство. — 2005. — № 2(34). — С. 64–66.

21. Худoley А.Л. Технология изготовления крупногабаритных червячных колес / А.Л. Худoley // Сб. тр. молодых ученых НАН Беларуси. — Минск: Право и экономика, 2003. — Т. III. — С. 67–70.
22. Кашицин, Л.П. Технологические схемы получения биметаллических червячных и зубчатых колес центробежным индукционным методом / Л.П. Кашицин, А.Л. Худoley, О.А. Баран // Защитные покрытия, сварка и контроль: материалы Междунар. техн. конф., Минск, 30 апр. 2006 г. — Минск, 2006. — С. 22–24.
23. Кашицин, Л.П. Разработка конструкций червячных колес и технологических схем их получения / Л.П. Кашицин, А.Л. Худoley, О.А. Баран // Сварка и родственные технологии. — 2007. — № 9. — С. 26–30.
24. Способ нанесения покрытий на наружные поверхности полых деталей: пат. ВУ 12195, МКИ6 В 22F 7/02, В 22D 19/00. / Л.П. Кашицин, А.Л. Худoley, И.А. Сосновский, А.В. Сосновский, О.А. Баран. — Оpubл. 30.08.09.
25. Система технического обслуживания и ремонта машин [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://cityref.ru/prosmotr/14444-7400.htm>. — Дата доступа: 05.03.06.
26. Моисеенко, В.И. Повышение служебных свойств деталей машин путем управления химической и структурной однородностью конструкционных сталей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.02, 05.02.08 / В.И. Моисеенко. — Минск, 1998. — 320 с.
27. Материалоемкость изделий машиностроения. Термины и определения: ГОСТ 27782-88. — Введ. 01.01.89. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 6 с.
28. Гречишев, Е.С. Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление / Е.С. Гречишев, А.А. Ильяшенко. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
29. Прессовые соединения. Технология изготовления и ремонт / Ю.Г. Проскураков [и др.]. — Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1977. — 112 с.
30. Solderless connections. Part 5: Press-in connections. General requirements, test methods and practical guidance: IEC 60352-5: 2012. — Ed. 4.0 2012-02 / International Electrotechnical Commission. — 66 p.
31. Reliability of PressFIT connections [Electronic resource] / T. Stolze [et al.]. — Mode of access: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PCIM_2008_Reliability_of_PressFIT-ED-v1.0-en.pdf?fileId=db3a30431a5c32f2011a5deca1a100ad. — Date of access: 05.04.2018.

KHUDOLEY Andrei L., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of High-Precision Surfacing Laboratory

E-mail: khudoley@hmti.ac.by

A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

BARAN Volha A.

Senior Researcher of the Laboratory of Agricultural Engineering Science

E-mail: baran_olga@yahoo.com

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 03 May 2018.

BUILT-UP WORM WHEELS: ENGINEERING, TECHNOLOGIES OF PRODUCTION AND RENOVATION

A general approach for design engineering of built-up worm wheels is proposed, which ensures a reduction of the consumption demand of non-ferrous metals, an increase in the resource by using different materials that are the most suitable for the operating conditions in tribological conjugations, and improves the maintainability by using replaceable elements fixed in/on the hub. The worm wheels are classified according to their constructive design. New repairable constructions of built-up worm wheels comprising the “steel-bronze” bimetallic elements: a rim, a nut and a sliding bearing are developed. These constructions allow to restore worn surfaces, to apply an appropriate materials and technologies to make the wheel and to repeatedly use the hub. The basic requirements for engineering such design and used materials are outlined. An algorithm for calculating built-up worm wheels with replaceable bimetallic elements is proposed based on the use of two- and three-layer cylindrical models, which allows to reduce the thickness of working layer. The three-layer model is represented by the hub cylinder and the pressed cylinder of a bimetallic element with an equivalent diameter for calculating the rim or the nut. The analysis of manufacturing technologies of worm wheels with a diameter up to 6300 mm is performed. The nomenclature of worm wheels used in six-spindle lathes is made. The features of repairing of a worm wheel with a diameter of 425 mm using a centrifugal method are disclosed. It is shown, that the developed constructions additionally allow obtaining the required tightness after machining the hub interface surfaces by manufacturing the replacement elements with new repair coupling size. It is revealed that the use of built-up worm wheels makes it possible to diminish the coefficient of applicability of non-ferrous alloys from 1.0 (for all-bronze ones) to 0.1–0.25 depending on the overall dimensions.

Keywords: built-up worm wheel, bimetallic exchangeable element, worm wheel production and renovation technologies

References

1. Smith R.C. *Gear-Wheel*. Patent USA, no. 458984, 1891.
2. Reshetov D.I. Sostoyanie i tendentsii razvitiya detaley mashin [Condition and trends in the development of machine parts]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Machine Engineering], 2000, no. 10, pp.11–15.
3. Kashitsin L.P., Khudoley A.L., Sosnovskiy I.A., Klimenko S.E. *Sostavnoye zubchatoye koleso* [Composite cogwheel]. Patent RB, no. 139, 2000.
4. Pashkevich M.F., Rogachevskiy N.I., Rogachevskiy S.N. *Chervyachnye peredachi kacheniya* [Worm gears rolling]. Mogilev, Belorussko-Rossiyskiy universitet Publ., 2005. 137 p.

5. Skoybeda A.T., Dankov A.M. *Peredatochnye mekhanizmy na osnove sostavnykh zubchatykh koles* [Transmission mechanisms on the basis of compound gear wheels]. Minsk, Belorusskaya gosudarstvennaya politekhnicheskaya akademiya Publ., 2000. 96 p.
6. Blagodarnyy V., e.a. *Chervyachnye peredachi: obshchie svedeniya, raschety, dinamika i nadezhnost* [Worm gears: general information, calculations, dynamics and reliability]. Baranovich, Baranovichskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2014. 271 p.
7. GOST 3675-81. *Osnovnye normy vzaimozamenyaemosti. Peredachi chervyachnye tsilindricheskie. Dopuski* [State Standard 3675-81. Basic requirements for interchangeability. Cylindrical worm gears. Tolerances]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1986. 61 p.
8. *Reduktory, motor-reduktory* [Reducers, motor-reducers]. Available at: <http://reductor.com.ua/reducers/3> (accessed 6 April 2018).
9. Kuzmin A.V., Chernin I.M., Kozintsov B.S. *Raschety detaley mashin: sprav. posobie* [Calculations of machine parts: reference book]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1986. 400 p.
10. Khudoley A.L., Baran O.A. *Sostavnoe zubchatoe koleso s sostavnoy stupitsej* [Composite cogwheel with compound hub]. Patent RB, no. 4714, 2009.
11. Karnaukh S.G. *Detali mashin: konspekt lektsiy* [Parts of machines: lecture notes]. Kramatorsk, Donbasskaya gosudarstvennaya mashinostroitel'naya akademiya Publ., 2002. 212 p.
12. Khudoley A.L., Baran O.A., Goman A.M. Metodika rascheta na prochnost bimetallicheskogo oboda chervyachnogo koleasa [Method for calculating the strength of a bimetallic rim of a worm wheel]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Matematicheskie modeli i algoritmy dlya imitatsii fizicheskikh protsessov"* [Proc. Int. Scientific and Technical Conference "Mathematical models and algorithms for simulation of physical processes"]. Taganrog, 2006, vol. 1, pp. 116–119.
13. Khudoley A.L., Baran O.A., Goman A.M. Proektnyy raschet bimetallicheskogo ventsa sostavnogo chervyachnogo koleasa [Design calculation of a bimetallic crown of a compound worm wheel]. *Ves. Nats. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. nauk* [Bulletin of the NAS of Belarus. Edition of Physics and Engineering], 2007, no. 3, pp. 60–68.
14. Baran O.A. Raschet bimetallicheskogo ventsa sostavnogo chervyachnogo koleasa boltovoy konstruksii [Calculation of a bimetallic rim of a composite worm wheel of bolted construction]. *Sbornik nauchnykh trudov V Belorusskogo kongressa po teoreticheskoy i prikladnoy mekhanike "Mekhanika-2011"* [Collection of scientific works of the Vth Belarusian Congress of Theoretical and Applied Mechanics "Mechanics-2011"]. Minsk, 2011, vol. 2, pp. 185–189.
15. Sandler A.I., Lagutin S.A., Verhovskiy A.V. *Proizvodstvo chervyachnykh peredach* [Production of worm gears]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 272 p.
16. Dudas Illes. *The Theory and practice of Worm Gear Drives*. London, Penton Press, 2000. 314 p.
17. Vasilkov D.V., Veyts V.L., Skhirtladze A.G. *Elektromekhanicheskie privody metalloobrabatyvayushchikh stankov. Raschet i konstruirovaniye* [Electromechanical drives of metal working machines. Calculation and construction]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2010. 759 p.
18. Khudoley A. Sovremennyye tendentsii v proektirovani i izgotovlenii chervyachnykh peredach [Modern trends in the design and manufacture of worm gears]. *Trudy Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma "Gidrodinamicheskaya teoriya smazki – 120 let"* [Proc. Int. Sci. Symp. "Hydrodynamic theory of lubrication – 120 years"]. Orel, 2006, vol. 2, pp. 196–209.
19. Dorozhkin N.N., e.a. *Elektrofizicheskie metody polucheniya pokrytiy iz metallicheskih poroshkov* [Electrophysical methods for obtaining coatings from metal powders]. Riga, Zinatne Publ., 1985. 131 p.
20. Marukovich E.I., e.a. Poluchenie bimetallicheskih zagotovok chervyachnykh koles metodom elektroshlakovogo pereplava [Production of bimetallic blanks of worm wheels by electroslag remelting]. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry], 2005, no. 2(34), pp. 64–66.
21. Khudoley A.L. Tekhnologiya izgotovleniya krupnogabaritnykh chervyachnykh koles [Technology of manufacturing large-sized worm wheels]. *Sbornik trudov molodykh uchenykh Natsionalnoy akademii nauk Belarusi* [Collection of works of young scientists of the National academy of Sciences of Belarus]. Minsk, 2003, vol. 3, pp. 67–70.
22. Kashitsin L.P., Khudoley A.L., Baran O.A. Tekhnologicheskie skhemy polucheniya bimetallicheskih chervyachnykh i zubchatykh koles tsentrobezhnym induktsionnym metodom [Technological schemes for obtaining bimetallic worm gears and cogwheels by a centrifugal induction method]. *Materialy Mezhdunarodnoy tekhnicheskoy konferentsii "Zashchitnye pokrytiya, svarka i kontrol"* [Proc. of International technological conference "Protective coatings, welding and control"]. Minsk, 2006, pp. 22–24.
23. Kashitsin L.P., Khudoley A.L., Baran O.A. Razrabotka konstruksiy chervyachnykh koles i tekhnologicheskikh skhem ikh polucheniya [Development of worm wheel designs and technological schemes for their production]. *Svarka i rodstvennyye tekhnologii* [Welding and Related Technologies], 2007, no. 9, pp. 26–30.
24. Kashitsin L.P., Khudoley A.L., Sosnovskiy I.A., Sosnovskiy A.V., Baran O.A. *Sposob naneseniya pokrytiy na naruzhnye poverkhnosti polykh detaley* [Method of coating on the outer surfaces of hollow parts]. Patent RB, no. 12195, 2009.
25. *Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta mashin* [System of maintenance and repair of machines]. Available at: <http://cityref.ru/prosmotr/14444-7400.htm> (accessed 5 March 2006).
26. Moiseenko V.I. *Povyshenie sluzhebnykh svoystv detaley mashin putem upravleniya khimicheskoy i strukturnoy odnorodnostyu konstruksionnykh staley*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Increase of service properties of machine parts by controlling the chemical and structural homogeneity of structural steels. D. Sc. Thesis]. Minsk, 1998. 320 p.
27. GOST 27782-88. *Materialoemkost izdeliy mashinostroeniya. Terminy i opredeleniya* [State Standard 27782-88. Material strength of engineering products. Terms and definitions]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1988. 6 p.
28. Grechishchev E.S., Ilyashenko A.A. *Soedineniya s natyagom: Raschety, proektirovaniye, izgotovleniye* [Press-fit connections: Calculations, design, manufacturing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 247 p.
29. Proskuryakov J.G., e.a. *Pressovyye soedineniya. Tekhnologiya izgotovleniya i remont* [Press connections. Manufacturing technology and repair]. Barnaul, Altayskoe knizhnoye izdatelstvo Publ., 1977. 112 p.
30. IEC 60352-5. *Solderless connections. Part 5. Press-in connections. General requirements, test methods and practical guidance*. International Electrotechnical Commission, 2012. 66 p.
31. Stolze T., Thoben M., Koch M., Severin R. *Reliability of PressFIT connections*. Available at: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PCIM_2008_Reliability_of_PressFIT-ED-v1.0-en.pdf?fileId=db3a30431a5c32f2011a5deca1a100ad (accessed 5 April 2018).