

## Выводы:

1. Для цилиндрических эвольвентных передач с арочными зубьями, нарезаемых пальцевой фрезой, предложена геометрия и выведены уравнения боковых поверхностей зубьев, позволяющая при увеличении коэффициента осевого перекрытия повысить изгибную прочность эвольвентных арочных зубьев у торцов.

2. За счет возможного увеличения коэффициента осевого перекрытия увеличивается суммарная длина контактных линий, следовательно, снижается удельная контактная нагрузка в зацеплении и улучшается плавность пересопряжения зубьев.

**Список литературы:** 1. Сидоренко А.К. Зубчатая передача "70-НКМЗ". – М.: Машиностроение, 1984. – 78с. 2. Мачей П.А. Исследование цилиндрического эвольвентного зацепления с арочными зубьями // Цилиндрические передачи с арочными зубьями. Расчет, проектирование, изготовление: Тез. докл. зонального семинара. – Курган, 1983. – 21с. 3. Беляев А.И., Емельянов Ю.В. Тяговая арочная эвольвентная цилиндрическая передача локомотивов // Вестник ВНИИЖТ. – 1994. – №2. – С.41-45. 4. Плахтин В.Д., Давыдов А.П., Паршин А.Н. Изготовление зубчатых колес с арочными зубьями с применением пальцевых фрез // Технологии машиностроения. – 2008. – №6. – С.12-15. 5. Калинин Д.В., Ананьев В.М., Кожаринов Е.В. Обоснование выбора параметров продольной модификации косозубых передач в трансмиссиях вертолетов // Вестник двигателестроения. – 2013. – №2. – С.17-19.

**Bibliography (transliterated):** 1. Sidorenko A.K. Zubchataya peredacha "70-NKMZ". – Moscow: Mashinostroenie, 1984. – 78p. 2. Macej P.A. Issledovanie cilindricheskogo jevol'ventnogo zacepleniya s arochnymi zub'jami // Cilindricheskaja peredachi s arochnymi zub'jami. Raschet, proektirovanie, izgotovlenie: Tез. dokl. zonal'nogo seminaru. – Kurgan, 1983. – 21p. 3. Beljaev A.I., Emel'janov Ju.V. Tjagovaja arochnaja jevol'ventnaja cilindricheskaja peredacha lokomotivov // Vestnik VNIIZhT. – 1994. – No2. – P.41-45. 4. Plahatin V.D., Davydov A.P., Parshin A.N. Izgotovlenie zubchatyh koles s arochnymi zub'jami s primeneniem pal'cevuyh frez // Tehnologija mashinostroeniya – 2008. – No6. – P.12-15. 5. Kalinin D.V., Anan'ev V.M., Kozharinov E.V. Obosnovanie vybora parametrov prodol'noj modifikacii kosozubuyh peredach v transmissijah vertoletov // Vestnik dvigatelestroeniya. – 2013. – No2. – P.17-19.

Поступила (received) 30.04.2015

УДК 621.833

**А.И. МИРОНЕНКО**, начальник отдела редукторов ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект", Николаев;

**В.Е. СПИЦЫН**, к.т.н., зам. генерального конструктора ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект";

**Е.А. ГАМЗА**, ведущий инженер-конструктор отдела редукторов ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект";

**Д.В. МАТВЕЕВСКИЙ**, ведущий инженер-конструктор отдела редукторов ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект";

**С.А. ДЗЯТКО**, ведущий инженер-конструктор отдела редукторов ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект"

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕДУКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА ГП НПКГ "ЗОРЯ"-МАШПРОЕКТ"

Представлены новые направления в проектировании, изготовлении и испытании зубчатых передач производства ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект". Приведены конструктивные особенности зубчатых зацеплений и других элементов редукторов. Показана модернизация редукторного производства высокоточным оборудованием и современными испытательными стендами. Возможности редукторного производства и квалификация его сотрудников дают возможность наладить производство зубчатых передач для любых отраслей промышленности Украины, а также выполнять большие объемы зарубежных заказов.

**Ключевые слова:** редуктор, зубчатые колеса, зубошлифовальные станки, испытательные стенды.

© А.И. Мироненко, В.Е. Спицын, Е.А. Гамза, Д.В. Матвеевский, С.А. Дзятко, 2015

**Введение.** Развитие современного машиностроения базируется на поисках новых технических решений, предусматривающих повышение нагрузочной способности, срока службы, уменьшения веса и габаритов, а также улучшения виброакустических характеристик выпускаемых изделий. Наиболее остро указанные требования проявляются при разработках высокоскоростных и тяжело нагруженных зубчатых передач редукторов. В связи с этим на Государственном предприятии Научно-производственный комплекс газотурбостроения "Зоря"-Машпроект постоянно внедряются передовые методы проектирования, изготовления и испытания редукторов и мультипликаторов различного назначения – морских, энергетических, стеновых и промышленных. Номенклатура выпускаемых редукторов и мультипликаторов приведена в [1].

**Проектирование редукторов.** Более чем за 60 лет накоплен большой теоретический и практический опыт проектирования редукторов различного назначения. Созданные высокоскоростные и тяжело нагруженные редукторы по многим показателям находятся на уровне лучших зарубежных изделий. Окружные скорости и удельные контактные нагрузки в зубчатых зацеплениях некоторых редукторов достигают соответственно 200м/с и 1000МПа. Для обеспечения работоспособности в пределах расчетного ресурса в конструкциях проектируемых редукторов применяются следующие расчетно-конструкторские и производственно-технологические решения.

1 Применение многопоточности в тяжело нагруженных редукторах.

Проектирование зубчатых передач выполняется по запросам Заказчиков для различных схем и параметров энергетических установок. Важнейшей составляющей успешной конструкции редуктора является выбор его оптимальной кинематической схемы, при которой обеспечивается:

- надежность и требуемый ресурс;
- минимальные массогабаритные показатели;
- максимальные функциональные возможности;
- удобство в эксплуатации и обслуживании.

С целью уменьшения массогабаритных показателей и улучшения работоспособности зубчатых зацеплений и подшипников конструкторами предприятия создан целый ряд оригинальных, многопоточных цилиндрических и конических редукторов, схемные решения которых защищены патентами СССР и Украины. Схемы и внешний вид некоторых запатентованных зубчатых передач показаны на рисунке 1.

2 Использование исходного контура с увеличенной высотой зуба.

С целью повышения плавности работы и снижения контактной и изгибной напряженности зубьев в конструкциях высокоскоростных и тяжело нагруженных редукторов используются модифицированные исходные контуры с увеличенной высотой головки зуба ( $h_a^* = 1,25$ ). Указанные исходные контуры обеспечивают гарантированную двухпарность в зацеплениях с коэффициентом торцевого перекрытия  $\epsilon_\alpha \geq 2$ . Сравнительные испытания редуктора с обычным "турбинным" исходным контуром по ГОСТ 8889-81 и модифицированным исходным контуром показали во втором варианте уровень шума редуктора на 6...8Дб ниже, чем в первом, что является неплохим результатом без существенного изменения конструкции [2].

3 Применение профильно-продольной модификации зубьев.

Для обеспечения плавности и малошумности зацепления зубьев, способствующие существенному улучшению виброакустических характеристик пере-

дачи, применяется профильная и осваивается в настоящее время продольная модификация зубьев (рисунок 2).

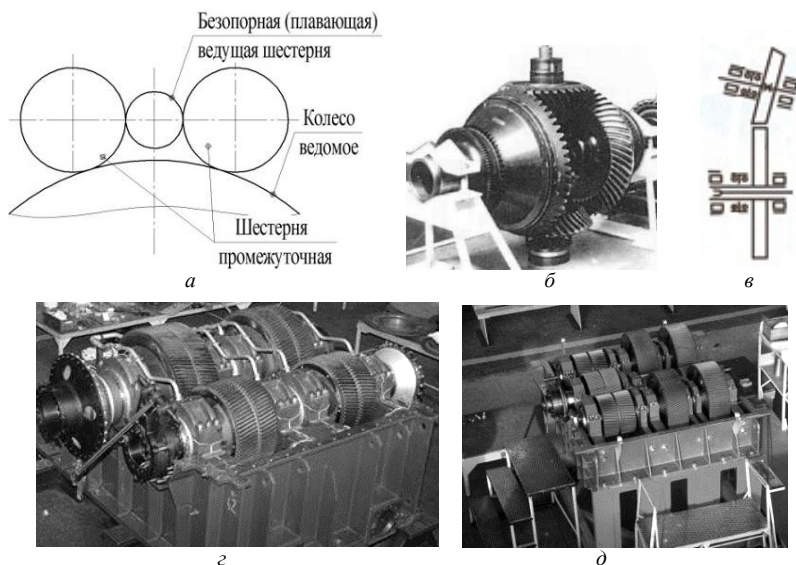


Рисунок 1 – Схемы и внешний вид некоторых запатентованных зубчатых передач  
 а – замкнутое цилиндрическое зацепление с безопорной (плавающей) ведущей шевронной шестерней;  
 б – замкнутая четырехшестеренная коническая передача с плавающей шестерней;  
 в – эвольвентно-коническое (гиперболоидное) двухпоточное зацепление;  
 з – двухпоточная косозубая передача; д – четырехпоточная косозубая передача

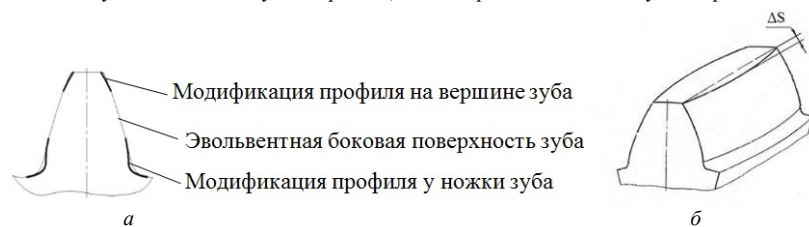


Рисунок 2 – Профильная и продольная модификация зубьев  
 а – профильная модификация; б – продольная модификация

Профильная модификация (подрезание головок и ножек) предусматривает существенное улучшение контактного взаимодействия зубьев при их входе и выходе из зацепления.

Продольная модификация осуществляется путем замены прямолинейных образующих боковых поверхностей зубьев криволинейными образующими с параметрами кривизны образующих боковых поверхностей зубьев в торцевых сечениях  $\Delta S = 0,005 \dots 0,030 \text{ мм}$ .

Выполнение профильно-продольной модификации зубьев с одновременным использованием исходного контура с увеличенной высотой зуба (п.2) обеспечивает следующие преимущества по сравнению с традиционными передачами:

- повышенную нагрузочную способность по контактным и изгибным напряжениям;

- улучшение виброакустических характеристик;
- стабилизация пятна контакта и избежание кромоочного контакта зубьев;
- компенсация погрешностей сборки зубчатых колес в собственных корпусах;
- компенсация ошибок изготовления зубьев и всевозможных упругих деформаций элементов редукторной передачи в эксплуатации.

4. Создание современных методов расчета зубчатых зацеплений и основных элементов редукторов.

Проектирование современных редукторов невозможно без теоретической базы, на основе которой уточняются и развиваются разделы и области, сдерживающие повышение нагрузочной способности передач. На предприятии разработаны и внедрены в практику современные методы расчета не только зубчатого зацепления, но и основных элементов редукторов – опор, сателлитодержателей, водил, подшипников, корпусов, упорных гребней, упругих эластичных и зубчатых муфт и др. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия зубьев с учетом погрешностей изготовления и упругих деформаций элементов передачи. В результате проведенных работ создан уточненный метод расчета прямоугольных, косозубых и шевронных колес высокоскоростных редукторов большой мощности. Особенность указанной методики – ее универсальность. Она позволяет производить по единым зависимостям расчеты на прочность зубчатого зацепления редукторов многих типов – цилиндрические передачи с параллельными осями и прямыми, косыми или шевронными зубьями, гиперболоидные передачи с перекрещивающимися осями и точечным или линейным контактом зубьев, конические передачи с криволинейной образующей зуба.

Проведенные научно-исследовательские работы сделали возможным принять коэффициенты прочности материалов для крупногабаритных зубчатых колес судовых и корабельных редукторов на 15-20% выше рекомендуемых авторитетными зарубежными классификационными обществами и создать редукторы для кораблей с динамическими принципами поддержания с удельной массой до 0,1 кг/л.с, что соответствует показателю авиационных редукторов [2].

5 Проектирование с помощью современной швейцарской программы "KISSsoft/KISSsys"

Для нас, как для крупного производителя редукторов, программный комплекс "KISSsoft/KISSsys" является неотъемлемым инструментом для проведения расчетов, которые мы используем в дополнение к нашим специализированным фирменным методикам для расчета зубчатых зацеплений и других силовых элементов редукторов.

Программный комплекс "KISSsoft/KISSsys" охватывает весь процесс проектирования, начиная от постановки задачи и заканчивая выпуском конструкторской и технологической документации, включая подготовку производства и проектирование инструмента для изготовления зубчатых колес. С помощью этой программы мы намерены создать интегрированную систему сквозного проектирования зубчатых передач, без которой невозможно создавать новые конкурентоспособные редукторы.

**Изготовление редукторов.** ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" имеет в своем составе одно из крупнейших в Европе и самое большое в Украине редукторное производство, где собран уникальный парк высокоточного зубообрабатывающего оборудования ведущих станкостроительных фирм мира. Все высокоточное оборудование установлено на виброизолированных фундаментах. Финиш-

ная обработка зубьев и окончательная (чистовая) расточка корпусов выполняются в отдельных термоконстантных участках (цехах), в которых поддерживается постоянная температура в пределах  $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$  (рисунок 3).

В настоящее время при изготовлении цилиндрических зубчатых колес с помощью немецких станков Gleason-PFAUTER реально достигнута четвертая (и даже выше) степень точности по ГОСТ 1643. Для повышения чистоты обработки и упрочнения впадин и поверхностей зубьев внедрен метод гидродробеструйной обработки.



Рисунок 3 – Станки Gleason-PFAUTER в термоконстантном цехе

Инструментальное хозяйство редукторного производства освоило выпуск всего режущего инструмента необходимой точности: долбяки класса АА, червячные фрезы класса ААА, сборные шеверы и абразивные хоны.

На всех этапах производства зубчатых колес осуществляется постоянный контроль их качества: от проверки марки материала и механических свойств заготовки до соответствия параметров готовой зубчатой передачи. В составе редукторного производства находится измерительная лаборатория, укомплектованная современным контрольным оборудованием. В ближайшее время измерительный парк пополнится современной координатно-измерительной машиной WENZEL.

**Испытания редукторов.** Все изготовленные редукторы проходят обязательные испытания на специальных стендах, воспроизводящих условия эксплуатации. Некоторые из многочисленных испытательных редукторных стендов показаны на рисунке 4.

С целью проведения опытно-доводочных работ, а также для проверки работоспособности в объеме заявленного ресурса вновь спроектированные и изготовленные конические и цилиндрические редукторы мощностью до 10...12МВт проходят испытания на специально создаваемых стендах замкнутого контура с циркулирующей нагрузкой с помощью гидравлических и механических нагрузочных устройств собственного производства (рисунок 4,а). Такие стенды отличаются экономичностью и позволяют полностью имитировать не только эксплуатационные режимы, но и экстремальные ситуации.

Для проверки качества сборки и функционирования редукторов, а также при предъявлении и сдачи их Заказчику используются полномерные испытательные стенды, на которых проходят испытания весь комплекс энергетической установки – двигатель, редуктор, трансмиссия, система автоматического регулирования и т.д. (рисунок 4,б). В качестве нагрузочных устройств таких стендов используются различные гидротормоза также собственного проектирования и изготовления.

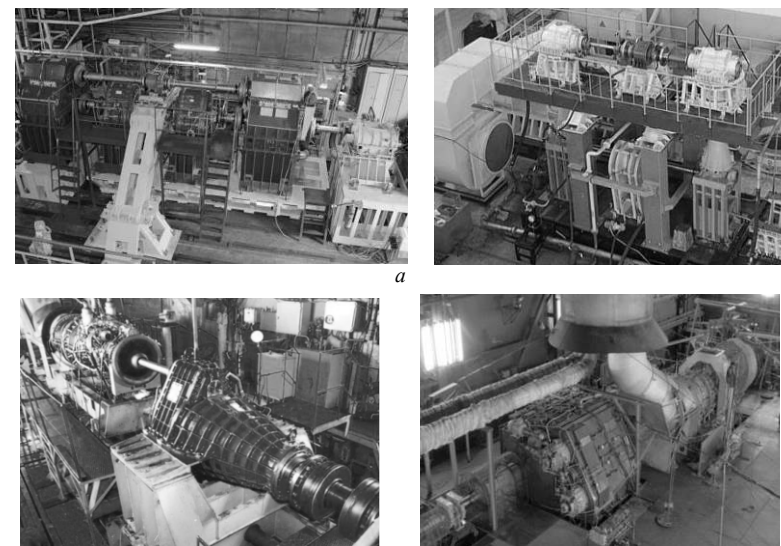


Рисунок 4 – Стенды для испытаний редукторов

а – стенды замкнутого контура; б – стенды со снятием нагрузки на гидротормоз

Кроме того, при создании новых редукторов используются наиболее прогрессивные методы поузловой (поэлементной, опережающей) доводки, когда к моменту изготовления первого образца вновь спроектированного (пилотного) редуктора большинство ее элементов и узлов уже испытаны на специальных статических и динамических стендах. На таких стендах испытывается и проверяется работоспособность подшипников качения и скольжения, уплотнительных элементов; выполняются статические испытания зубчатых зацеплений и различных муфт (дисковых, зубчатых); проверяются собственные частоты колебаний дисков зубчатых колес и муфт методом голографической интерферометрии и т.д.

#### Выводы:

1. Созданные в ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" редукторы по своим характеристикам не уступают лучшим мировым образцам.
2. Мощность редукторного производства и квалификация его сотрудников дают возможность наладить производство зубчатых передач для любых отраслей промышленности Украины, а также выполнять большие объемы зарубежных заказов.

**Список литературы:** 1. Каталог выпускаемых изделий ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект". УкрОборонПром. – Николаев, 2012. – 10с. 2. Николаевские газотурбинные двигатели и установки. История создания // ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект", Центр НИОКР "Машпроект"; Под общ. ред. докт.техн. наук В.И. Романова. – Николаев: Изд-во "Юг-Информ", 2005. – 302с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Katalog vypuskaemykh izdelij GP NPKG "Zorja"- "Mashproekt". UkrOboronProm. – Nikolaev, 2012. – 10p. 2. Nikolaevskie gazoturbinnye dvigateli i ustanovki. Istorija sozdaniya // GP NPKG "Zorja"- "Mashproekt", Centr NIOKR "Mashproekt"; Pod obshh. red. dokt.tehn.nauk V.I.Romanova. – Nikolaev: Izd-vo "Jug-Inform", 2005. – 302p.

Поступила (received) 28.04.2015