

УДК 621.831.01

А.М. Даньков, д-р техн. наук, С.И. Родионова (Белорусско-Российский университет)
В.А. Красовский, М.М. Турандин (ОАО "Могилевхимволокно")

Некоторые доводы в пользу сборной конструкции крупногабаритных зубчатых колес приводов технологического оборудования

Обоснована целесообразность сборочно-сварочной конструкции быстроизнашивающихся или изнашивающихся неравномерно крупногабаритных зубчатых колес. Описаны приемлемые варианты такой конструкции и даны оценки их эффективности.

The expediency assembling and welding designs wearing out non-uniformly large-sized cogwheels is proved. Comprehensible variants of such design are described and estimations of their efficiency are given.

К числу сложных технических устройств, в состав которых входят крупногабаритные зубчатые колеса, относятся: кузнечно-прессовое оборудование, опорно-поворотные устройства различного типа, лебедки грузоподъемных устройств и т.д. Характерными условиями функционирования этих зубчатых колес являются:

- ♦ значительные нагрузки;
- ♦ невысокие окружные скорости;
- ♦ отсутствие повышенных требований к кинематической точности.

Зубья крупногабаритных зубчатых колес, очень часто работающих при недостаточном количестве смазочного материала под действием больших нагрузок, подвержены истиранию (абразивному изнашиванию) рабочих поверхностей. Причем интенсивному износу подвержены те зубья зубчатого венца, которые зацеплены с сопряженной шестерней в процессе совершения рабочим органом оборудования полезной работы (операции холодной штамповки, прессовки, обрезки заусенцев, гибки и профилирования изделий из листового металла и т.д.).

По данным предприятий, эксплуатирующих вышеуказанное оборудование, срок службы крупногабаритного зубчатого колеса до утраты работоспособности, вызванной катастрофическим износом зубчатого венца (или его фрагмента), при

работе оборудования при полной загрузке в три смены равен 1,5...2 года. Причем потеря массы зубчатого колеса за счет износа зубчатого венца ничтожно мала и составляет порядка 0,5...1 % от общей массы крупногабаритного зубчатого колеса. На сегодняшний день ситуация такова, что, несмотря на это, остальные 99...99,5 % массы изношенного колеса представляют ценность для предприятия разве только как вторичное сырье, потому что большинство предприятий не находит возможности для их восстановления.

Приобретение же нового крупногабаритного зубчатого колеса у завода-изготовителя оборудования, как правило, сопровождается дополнительными затратами времени на транспортировку, финансовыми и юридическими трудностями. Очень часто потребитель, не имея тесной связи с изготовителем и, следовательно, дополнительной технической информации, осуществляет неправильный монтаж нового крупногабаритного зубчатого колеса, что может привести к его преждевременному выходу из строя по причине износа.

Характерная в последнее время для значительного числа предприятий нехватка средств для приобретения новых крупногабаритных зубчатых колес вынуждает их искать способы восстановления зубчатых венцов этих колес самостоятельно (своими силами) и без лишних затрат. Одним из таких самых распространенных и доступных способов является наплавка зубьев – длительная, трудоемкая и дорогостоящая процедура, являющаяся в значительном числе случаев полумерой, частичным решением вопроса.

В целях улучшения эксплуатационных характеристик зубчатые колеса уже давно выполняют составными [1]. Хорошо отработаны методы объединения в единое целое зубчатого венца, обода, диска и ступицы, позволяющие улучшать конкретные параметры как зацепления, так и зубчатого колеса. Аналогичный подход может послужить основой и



для улучшения таких эксплуатационных характеристик крупногабаритных зубчатых колес, как ремонтпригодность, точность, технологичность.

Если к технологическому оборудованию, в состав которого входят крупногабаритные зубчатые колеса, не предъявлять высоких требований по точности, скорости и плавности вращательного движения, то приемлемой альтернативой цельному крупногабаритному зубчатому колесу может служить составное полисекторное зубчатое колесо (СПЗК).

Обод СПЗК образован однотипными фрагментами – зубчатыми секторами, равномерно расположенными на его периферии [2]. При этом возможны следующие варианты составной конструкции крупногабаритного зубчатого колеса, различающиеся способами соединения основных деталей (ступиц, дисков и секторов зубчатого венца):

- сборная конструкция – соединение ступиц, дисков и секторов с помощью разъемных соединений;
- сварная конструкция – соединение ступицы, дисков и секторов с помощью дуговой сварки;
- сборочно-сварочная конструкция – соединение ступицы и дисков при помощи сварных операций, соединение дисков и секторов при помощи разъемных соединений.

Основные варианты соединения дисков и зубчатых секторов показаны на рис. 1.

В целях снижения стоимости восстановления крупногабаритных зубчатых колес в условиях неспециализированного предприятия, не имеющего оборудования для механической обработки крупногабаритных заготовок, сопрягаемые поверхности зубчатых секторов и дисков целесообразно выполнять плоскими и перпендикулярными к осям симметрии секторов. Тогда изготовление отдельных фрагментов зубчатого венца может быть обеспечено применением универсального оборудования, в связи с чем ремонтпригодность зубчатого колеса такой конструкции повышается.

На рис. 1, а, б диски 2 по периферии имеют фрезерованную базовую поверхность, выполненную в виде правильного многогранника, к плоским граням которого также плоскими гранями (односторонними (рис. 1, а) или двусторонними (рис. 1, б) прилегают зубчатые сектора 1 и затем крепятся к торцу диска посредством болтов 3 и штифтов 4.

В варианте по рис. 1, в, г диски 2 по периферии имеют цилиндрическую (одностороннюю или дву-

стороннюю) базовую поверхность, по которой цилиндрическими поверхностями равного радиуса базируются зубчатые сектора 1 и крепятся к торцу диска посредством болтов 3 и штифтов 4. Как видно из рис. 1, в, зубчатый сектор 1 не имеет базовой поверхности, определяющей его радиальное положение, и крепится между двумя дисками 2 с помощью болтового 3 и штифтовых 4 соединений.

В случае, соответствующем рис. 1, г, зубчатые сектора 1, базирующиеся по цилиндрической поверхности 3, при помощи сварки крепятся к предварительно обработанному ободу 2 зубчатого колеса, что предполагает необходимость дополнительной механической обработки зубьев составного зубчатого колеса в сборе, вследствие чего зубчатое колесо такой конструкции имеет ограниченное применение.

Из рис. 1, д видно, что зубчатые сектора 1 своими точно обработанными поверхностями 5 и 6 базируются по периферии и торцу обода диска 2 зубчатого колеса и крепятся при помощи болтовых 3 и штифтовых 4 соединений.

В случае, соответствующем рис. 1, е, зубчатые сектора 1 винтами 3 крепятся к предварительно обработанному ободу зубчатого колеса 2.

В случаях, которым соответствуют рис. 1, а, б и в, зубчатые сектора 1 жестко соединены с дисками 2 зубчатого колеса болтами 3 с окончательной фиксацией штифтами 4 после обкатки собранного колеса под нагрузкой, равной 0,1...0,3 величины номинальной нагрузки для придания зубчатому венцу требуемых кинематических характеристик.

При реализации вариантов по рис. 1, г, д и е зубчатые сектора 1 могут быть установлены на предварительно обработанный обод цельного зубчатого колеса, утратившего работоспособность из-за износа зубьев. Практически во всех случаях зубчатые сектора могут быть изготовлены из зубчатого колеса заготовки с меньшим до 2,5 раз делительным диаметром и тем же модулем [2], хотя наиболее предпочтительным при этом является вариант сборки по рис. 1, а. Минимальное число зубьев колеса заготовки z_{\min} для изготовления зубчатых секторов может быть определено из выражения

$$\{\arccos[((z_k + z_{\text{ш}})^2 + (z_k - z_{\min})^2 - ((z_{\min} + (1,75 \dots 1,8)) + (z_{\text{ш}} + 2))^2 / (2(z_k + z_{\text{ш}})(z_k - z_{\min}))]\} n_c / \pi = \varepsilon_c,$$

где z_k – реальное число зубьев колеса;

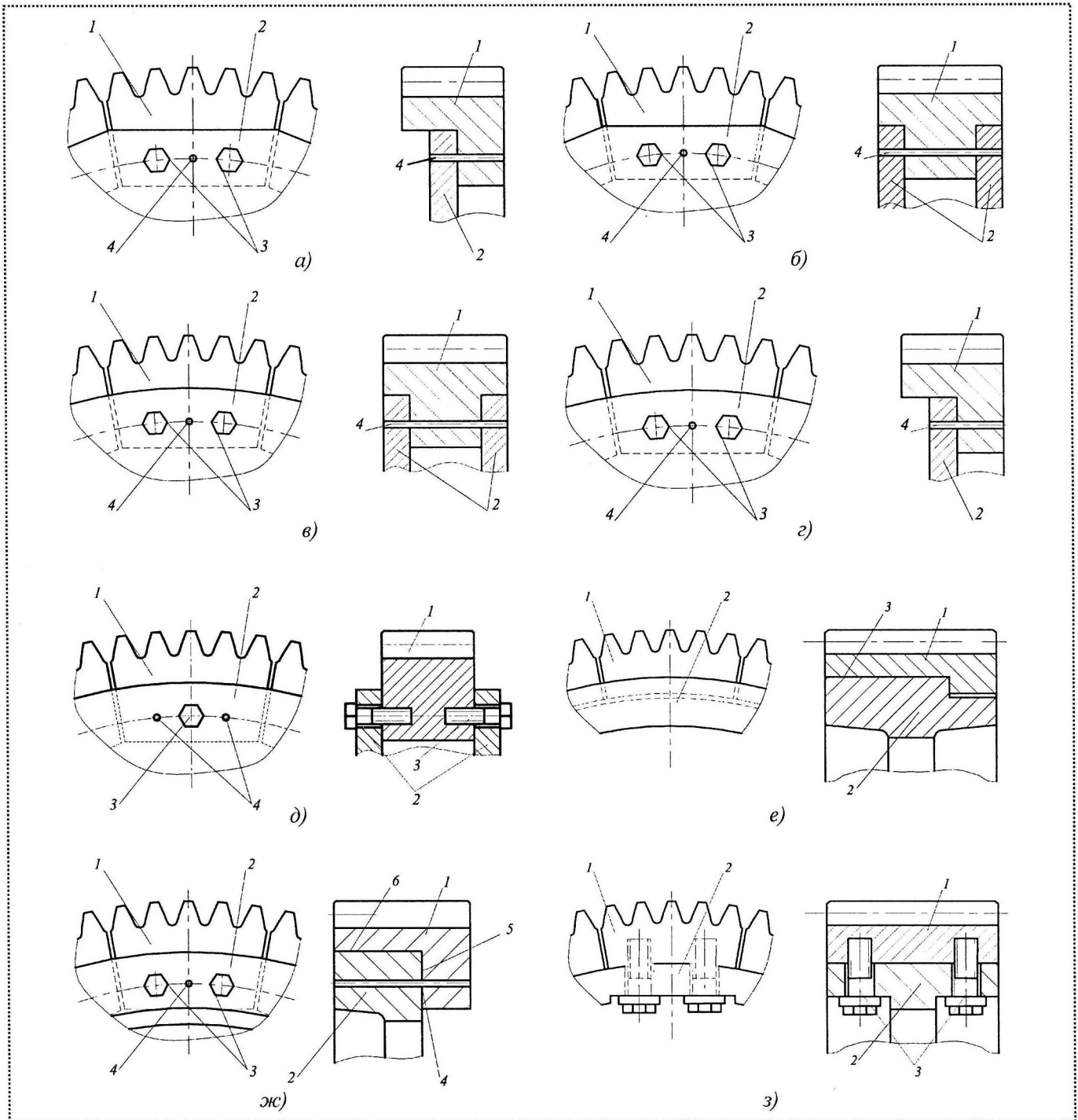


Рис. 1. Варианты соединения дисков и зубчатых секторов составных полисекторных зубчатых колес:

1 – зубчатый сектор; 2 – диск; 3 – болт; 4 – штифт; 5, 6 – точно обработанные поверхности

$z_{ш}$ – число зубьев сопряженной шестерни;
 n_c – число секторов, образующих венец крупногабаритного зубчатого колеса;
 ϵ_c – коэффициент торцового перекрытия секторов – понятие, аналогичное понятию торцового коэффициента перекрытия зубьев.

Эта зависимость основана на допущении, что контакт вершины зуба шестерни с боковой поверхностью зуба колеса будет начинаться в точке, отстоящей от окружности вершин колеса на расстоянии, равном $0,2 \dots 0,25$ модуля зацепления. Оптимальное число зубьев сектора – $5 \dots 8$, нежелатель-

ные значения коэффициента торцового перекрытия секторов менее 1,1.

Варианты сопряжения диска 2 (см. рис. 1) со ступицей 5 приведены на рис. 2.

Очевидно, что замена цельного крупногабаритного зубчатого колеса составным полисекторным, решая проблему ремонта первого, создает некоторые трудности при изготовлении и эксплуатации последнего, а именно:

- изготовление зубчатых секторов по сравнению с изготовлением цельных зубчатых колес требует дополнительной оснастки и инструмента (см. ниже);

- после сборки, требующей дополнительной обработки и дополнительных деталей, необходима обкатка перед окончательной фиксацией секторов составного зубчатого колеса, однако этот недостаток, как и предыдущий, не представляется чрезмерным при полном отсутствии возможностей изготовления цельных колес собственными силами;

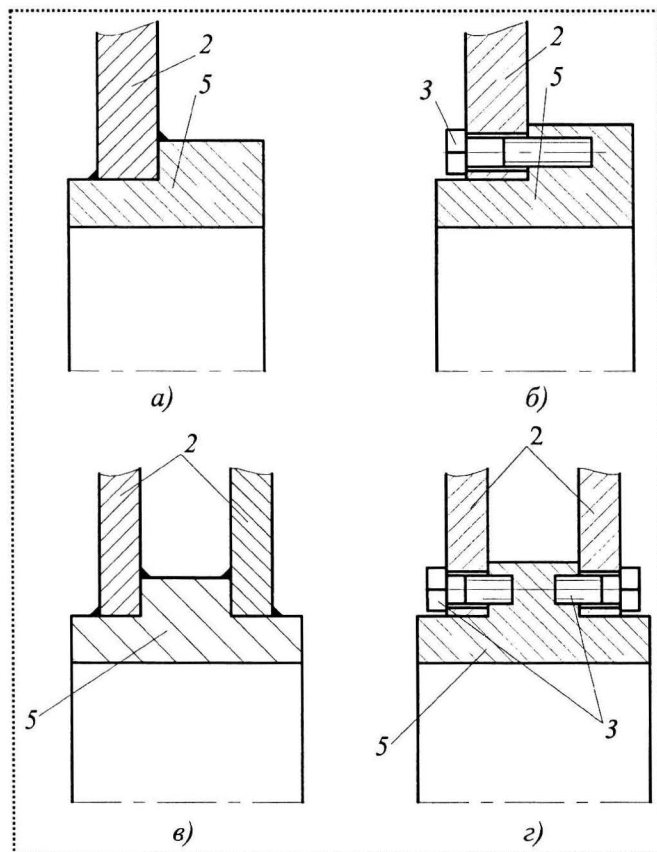


Рис. 2. Варианты соединения дисков и ступицы составных полисекторных зубчатых колес:

a – крепление одинарного диска сваркой; *б* – крепление одинарного диска болтами; *в* – крепление сдвоенного диска сваркой; *г* – крепление сдвоенного диска болтами

- использование в конструкции СПЗК секторов с делительным радиусом меньшим, чем номинальный (радиус цельного зубчатого колеса), естественно, сказывается на кинематических характеристиках передачи, но в обоснованных случаях может быть рекомендовано без отрицательных последствий для рабочих органов технологического оборудования.

Естественными и уместными при этом являются требования обеспечения прочности и точности составного колеса. Элементарные расчеты, подтверждающие общую правомерность вышеизложенного подхода, позволяют составить следующую картину. Наиболее критичными с точки зрения способности воспринимать рабочие нагрузки являются варианты сборки зубчатого венца по схемам, приведенным на рис. 1, *a* и *e*. В процессе функционирования зубчатого колеса сектор будет подвержен действию окружной F_t и радиальной F_r сил в зацеплении, связанных соотношением

$$F_r = F_t \cos \alpha,$$

где α – угол зацепления.

Наихудшим случаем приложения этих сил является то положение сектора, при котором его базовая поверхность расположена под углом 20° , потому что при этом перпендикулярные к базовой поверхности составляющие сил в зацеплении будут равны, и сила трения сектора по базовой поверхности будет равна нулю, а на сектор будут действовать сдвигающая сила, равная сумме составляющих сил в зацеплении, лежащих в этой плоскости, а также момент, равный разности моментов сил F_t и F_r относительно точки *A* (см. рис. 3).

Проведем простейший анализ прочности сборной конструкции зубчатого колеса со следующими параметрами: модуль зацепления $m = 10$ мм; число зубьев шестерни $z_1 = 20$; число зубьев колеса $z_2 = 64$; зубчатый венец колеса изготовлен из восьми 8-зубых секторов; ширина зубчатого венца $b = 160$ мм; твердость материала для изготовления зубчатых колес 280 НВ; срок службы – длительный. Принимая значения коэффициентов долговечности $Z_N = 1$ и безопасности $S_H = 1,1$, найдем значение допускаемых контактных напряжений $[\sigma_H] = 573$ МПа. Принимая значение коэффициента концентрации напряжений $K_{H\beta} = 1,2$, найдем максимальный крутящий момент $T_2 = 8277$ Н·м на выходном валу передачи, которому соответствуют

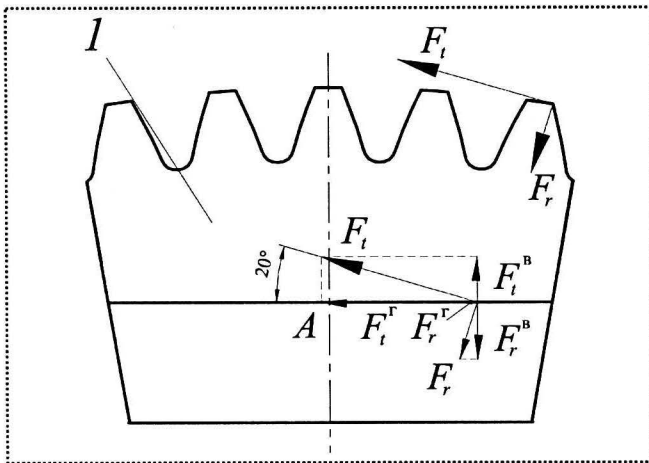


Рис. 3. Схема нагружения зубчатого сектора силами в зацеплении

значения $F_t = 25\,866$ Н и $F_r = 9\,414,5$ Н. В этом случае на каждый из четырех болтов, соединяющих сектор и обод, придется сдвигающая сила, равная $6\,881,5$ Н. При отсутствии специальных воспринимающих сдвигающую нагрузку деталей (штифтов) работоспособность соединения обеспечат болты М27. Причем для восприятия указанной сдвигающей нагрузки достаточно штифта диаметром 8 мм из низколегированной улучшенной стали, благодаря чему диаметр болтов может быть уменьшен более чем в два раза. Момент M , раскрывающий прямоугольный стык, образованный базовыми поверхностями сектора и обода, будет равен $1\,033,9$ Н·м, предотвращая раскрытие стыка с помощью четырех болтов М12.

Показатели точности и плавности работы цельных зубчатых колес не поддаются корректировке. Из семи показателей кинематической точности [3] три показателя, а именно, наибольшая кинематическая погрешность, радиальное биение, колебание измерительного межосевого расстояния могут быть откорректированы благодаря сборной конструкции зубчатого колеса.

Из шести показателей [3], определяющих плавность работы передачи, управляемыми в передачах со сборными зубчатыми колесами могут быть два: местная кинематическая погрешность и циклическая погрешность. Так как допусковое радиальное биение зубчатого венца для колеса с вышеприведенными размерами составляет при восьмой степени точности 110 мкм, то разновысотность базовых поверхностей (см. рис. 1, а) или отклонение

базовой поверхности от цилиндричности не должно превышать указанной величины.

Перед заменой цельного зубчатого колеса составным полисекторным колесом необходимо:

1. Получить картину напряженно-деформированного состояния основных элементов СПЗК, для чего необходимо (при отсутствии возможности использования ЭВМ) выполнить уточненные проектные и проверочные расчеты зубчатого зацепления, сварного или разъемного (болтового и штифтового) соединений по главным критериям работоспособности, назначенным исходя из анализа условий работы и режимов функционирования технологического оборудования данного конкретного вида. При этом возможные риски компенсируются назначением повышенных коэффициентов запаса прочности.

Заключительное решение о замене желательно базировать на результатах экспериментальной проверки работоспособности принятого технического решения.

2. Правильно выбрать технологический маршрут изготовления полисекторного колеса, исключая операции литья заготовки, и грамотно построить технологические процессы изготовления зубчатого сектора и сборки зубчатого колеса.

Заготовками для дисков и ступицы может служить различного вида стальной прокат. Зубчатые сектора могут быть изготовлены из цельного зубчатого колеса требуемого или меньшего (см. выше) делительного диаметра или при помощи соответствующей механической обработки заготовки сектора в виде поковки или стального проката. Необходимо отметить, что по сравнению с литой заготовкой поковка обходится дешевле и имеет более высокое качество.

3. Обеспечить квалифицированное выполнение сборочных и доводочных операций, при котором достигается минимальная погрешность окружного шага зубчатых секторов, изготовив специальное приспособление, позволяющее выставить и отрегулировать положение секторов зубчатого венца. Это приспособление окупается только при серийном ремонте зубчатых колес с близкими по значениям геометрическими характеристиками.

Накопленный при проведении предварительных исследований опыт показывает, что квалифицированный технолог без особого труда наметит технологический маршрут изготовления составного зубчатого колеса, обеспечивающий небольшое



увеличение трудоемкости механической обработки по сравнению с изготовлением цельного крупногабаритного зубчатого колеса и достижение значительного экономического эффекта за счет отказа от литой заготовки и использования проката и поковок.

Наибольшую трудность представляет выполнение операции нарезания зубьев сектора. Эта проблема может быть решена следующим образом. Зубья сектора нарезают методом копирования, а поскольку при его реализации нет необходимости в повороте заготовки относительно геометрического центра делительной дуги, то каждое делительное перемещение заготовки можно представить в виде суммы двух поступательных перемещений вдоль произвольно выбранных координатных осей, жестко ориентированных относительно станка, и поворота относительно начала координат, жестко связанного с заготовкой. Указанные перемещения могут быть реализованы с помощью простого приспособления, закрепляемого на столе, например, универсального горизонтально-фрезерного станка.

Эти принципы позволяют существенно снизить стоимость не только ремонта, но и изготовления новых крупногабаритных зубчатых колес на специализированных предприятиях, так как изготовление зубчатого венца диаметром более трех метров потребовало бы применения уникальных станков. Кроме того, эти принципы вписываются в рамки одного из перспективных направлений в современном проектировании – переходе взамен литья на ковку, штамповку и использование проката [4, 5]. Таким образом, представляется целесообразным использование СПЗК уже на стадии проектирования и даже серийного изготовления технологического оборудования, составной частью которого являются крупногабаритные зубчатые колеса, при этом цена оборудования как новой улучшенной потребительской стоимости будет выше.

Однако основной характеристикой, прежде всего интересующей потребителя любого оборудования, является соотношение приемлемой цены и удовлетворительного качества при определенных эксплуатационных показателях этого оборудования.

Повышенные затраты потребителя при приобретении нового оборудования, в составе которого используются СПЗК, с течением времени окупаются за

счет полезного эффекта, полученного в той или иной форме за счет:

- повышения ремонтпригодности оборудования и увеличения общего срока его службы;
- снижения материалоемкости ремонта крупногабаритных зубчатых колес;
- комплектации запасных частей, инструментов, приспособлений (ЗИПа) технологического оборудования не цельными зубчатыми колесами, а набором зубчатых секторов.

Выгода производителя технологического оборудования с СПЗК проявится в виде суммарного экономического эффекта, полученного от:

- повышения качества заготовок крупногабаритного зубчатого колеса сборочно-сварочной конструкции, исключения брака литья и увеличения коэффициента использования материала;
- сокращения номенклатуры заготовок для венцов крупногабаритных зубчатых колес составной конструкции за счет использования зубчатых секторов с одинаковым делительным радиусом, увеличивая число которых можно получать составные зубчатые колеса различных делительных диаметров без значительного ухудшения качества функционирования передачи;
- расширения технических возможностей производимого оборудования, а именно, относительно простой реализации ступенчатого регулирования скорости рабочего органа за счет изменения передаточного отношения передачи с СПЗК путем регулирования делительного диаметра последнего.

Вывод

Основываясь на принципах, изложенных выше, можно организовать как изготовление, так и восстановление крупногабаритных зубчатых колес на одном, наиболее подходящем для этих целей предприятии промышленного региона, способном удовлетворить потребности остальных предприятий.

Список литературы

1. Решетов Д.Н. Детали машин: учебник для вузов. Изд. 4-е, испр. и перераб. М.: "Машиностроение", 1989. 496 с.
2. Скойбеда А.Т. Передаточные механизмы на основе составных зубчатых колес / А.Т. Скойбеда, А.М. Даньков. Минск: БГПА, 2000. 96 с.
3. Марков А.Л. Измерение зубчатых колес (допуски, методы и средства контроля). Изд. 4-е, перераб. и доп. Л.: "Машиностроение" (Ленингр. отд-ние), 1977. 280 с.
4. Орлов П.И. Основы конструирования. Кн. 1 и 2. М.: Машиностроение, 1988.
5. Крайнев А.Ф. Идеология конструирования. М.: Машиностроение-1, 2003. 384 с.