

УДК 812.35.03.01

Н. А. ПЕЛИПЕНКО, д-р техн. наук

ФГАОУ ВПО "БелГУ", г. Белгород

С. Н. САНИН, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО "Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова"

E-mail: osup-sns@yandex.ru

## Аддитивная безрамная технология производства крупногабаритных шестерен вращающихся агрегатов

В статье рассмотрена возможность производства крупногабаритных шестерен вращающихся агрегатов из проката с использованием сварки. В статье представлен вариант конструкции крупногабаритной венцовой шестерни вращающейся печи в виде сварной конструкции. Авторы предлагают изготавливать зубчатые венцы в виде секторов из нескольких зубьев, формируя их методами пластического деформирования с последующим привариванием к несущему ободу зубчатого колеса. Приводят технологические рекомендации, призванные обеспечить точность сборки шестерен и их последующую надежность. При этом образовавшиеся полости внутри зубьев для обеспечения их жесткости предлагается заполнять высокопрочным бетоном или полимерным материалом.

The article considers the possibility of producing rotating aggregates large-sized gears from rolled products using welding. The article presents the design version of the large crown gear of the rotary kiln in the form welded construction. The authors propose to make gear crowns in the form of sectors with several teeth, forming them by plastic deformation methods with followed welding to the support rim of the gear. The technological recommendations is designed to ensure the accuracy of gears assembly and their subsequent reliability are adduced. In this case, it is proposed to fill the cavities formed inside the teeth with high-strength concrete or polymer material enabling to gear stiffness.

**Ключевые слова:** крупногабаритная шестерня, сварная конструкция, приварка зубчатого сегмента, безрамная технология, формообразование зубьев

**Key words:** large-sized gear, welded construction, gear segment welding, frameless technology, tooth shaping

В статье рассмотрена возможность производства крупногабаритных шестерен любых размеров по месту их монтажа. Настоящая статья предваряет вторую статью, которая будет посвящена окончательной прецизионной обработке шестерни: посадочных мест, отверстий и зубчатого зацепления.

Для приведения во вращение крупногабаритных технологических барабанов, таких как цементные печи, применяются механические зубчатые приводы, выходными звеньями которых являются крупногабаритные венцовые

шестерни. Эти шестерни имеют свои конструктивные особенности, которые влияют как на процессы их производства, так и на их последующую эксплуатацию.

В названии венцовых шестерен кроется одна из особенностей их конструкции. В специальной литературе [1] венцовые шестерни именуются просто как "венцы". Такие зубчатые колеса не содержат как таковой ступицы, а имеющееся центральное отверстие не является той основной базой, посредством которой венцовая шестерня устанавливается на вра-

щающуюся деталь. Вместо этого установка осуществляется посредством тангенциальных пружин, крепление к которым производится с помощью системы отверстий равномерно расположенных непосредственно в теле венца.

Венцовые шестерни технологических барабанов достигают значительных габаритных размеров. Так, венцовая шестерня типовой цементной печи  $5 \times 185$  м имеет наибольший диаметр 7852 мм. Модуль зуба такой венцовой шестерни равен 45 мм, а число зубьев — 172 шт. В практике возможно применение зубчатых венцов с модулем зуба до  $m = 100$  мм и числом зубьев до  $Z = 200$  шт.

Как правило, зубчатые колеса такого размера изготавливают сборными из двух и более частей, что связано с возможностями применяемого станочного оборудования и средств транспорта. При этом окончательную сборку венцовых шестерен производят на местах их эксплуатации. Окончательная сборка, как правило, выявляет недостатки производства, которые выливаются в значительные искажения формы готовых венцов. Следствием этого является нарушение кинематической точности зубчатой передачи, неравномерное распределение напряжений по линиям контакта зубьев, ускоренный усталостный и фрикционный износ зубьев.

Анализ большого числа зубчатых венцов, применяемых для приведения в движение вращающихся обжиговых печей, результаты которого представлены в работе [2], показал, что основной причиной недостаточной долговечности этих деталей являются ошибки монтажа, которые в свою очередь тесно связаны с погрешностями изготовления этих деталей. Например, согласно [2], несовпадение половин венцовой шестерни при монтаже может достигать 30 мм и более. Такое несовпадение происходит в результате пружинения полуколец венцовой шестерни. Оно может быть устранено применением гидравлических домкратов в процессе сборки, однако следствием этого становится искажение формы окружности венцовой шестерни, которая приобретает эллиптичность в радиальном сечении и отклонение от плоскостности в продольном сечении.

Для выяснения причин искажений формы элементов венцовых шестерен следует обратиться к технологическим особенностям их изготовления.

В отечественном машиностроении принято заготовки венцовых шестерен изготавливать литьем из стали 45Л. Анализ [2] отливок венцовых шестерен показал их невысокое качество: наличие пор, раковин, значительные превышения величины припусков.

Полученные отливки подвергают отжигу. Исследования [2] показали, что зачастую твердость материала венцовых шестерен после отжига превышает величину 185НВ, тогда как согласно ГОСТ 997—88 твердость стали 45Л в отожженном состоянии должна лежать в пределах 153...179 НВ.

Точность и качество поверхностей после карусельной и зубофрезерной операций не соответствуют требованиям, предъявляемым к ним. Так, после токарной обработки овальность заготовки может достигать 4...5 мм, а в некоторых случаях и 12 мм. Также страдает профиль зубьев.

За рубежом уже давно практикуется замена способа получения заготовок венцовых шестерен с литья на сварку. Что касается качества применяемых материалов, то при этом есть возможность для зубчатого обода применять ковную сталь повышенной прочности. Такой материал исключает риск появления включений, полостей, трещин и раковин, свойственных отливкам, а современные технологии сварки [3] позволяют выполнять соединения стальных профилей большой толщины, обеспечивая высокое качество сварных швов.

Возможная конструктивная реализация сварной венцовой шестерни вращающего барабана представлена на рис. 1. При этом исключается потребность в создании литейных форм, в назначении избыточных припусков под механическую обработку, а также исключает ограничения на применяемые марки сталей. Переход на сварную технологию приводит к сокращению стоимости и продолжительности изготовления крупногабаритных венцовых шестерен, что важно как при создании новых технологических барабанов, так и при необ-

ходимости выполнения оперативной замены поврежденного изделия.

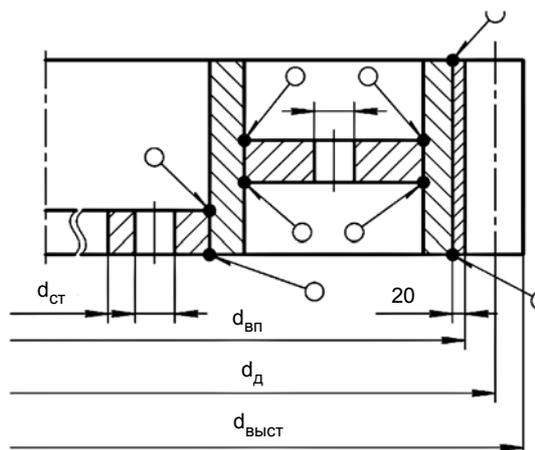
Зубчатые профили крупногабаритных венцовых шестерен при величинах модулей до  $m = 100$  мм имеют высоту зуба до 225 мм. В этой связи интересной представляется возможность изготовления методом сварки не только ступичных частей венцовых шестерен, но и самих зубчатых профилей, как это делается, например при изготовлении крупногабаритных пустотелых изделий [4]. Причем применительно к зубьям венцовых шестерен конструкцию готовых изделий можно усовершенствовать за счет последующего заполнения образовавшихся полостей прочным и недорогим наполнителем [5].

Такие зубчатые профили могут быть выполнены методом гибки из стального разрезанного листового проката или полосы (рис. 2) толщиной в 10—16 мм в зависимости от модуля и величины передаваемой нагрузки. При этом из каждой единицы прокатного профиля может быть изготовлена только ограниченная часть общего количества зубьев. Такую часть можно назвать зубчатым сектором или сегментом. Она будет включать несколько готовых зубьев, представляющих собой череду выступов и впадин с заданной высотой и шагом.

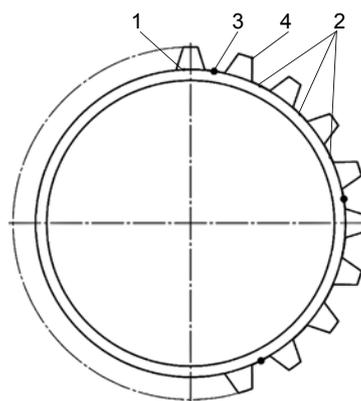
Каждый сегмент должен быть плотно прижат и приварен к готовому сварному корпусу венцовой шестерни. При этом, как показано на рис. 3 могут быть использованы тангенциальные и продольные сварные швы, выполняемые, соответственно на боковых поверхностях и на внутренних сторонах гнутого профиля в зоне впадин.

Смежные сегменты гнутого зубчатого профиля привариваются совместно или по отдельности к корпусу венцовой шестерни, путем образования общего продольного сварного шва (рис. 2).

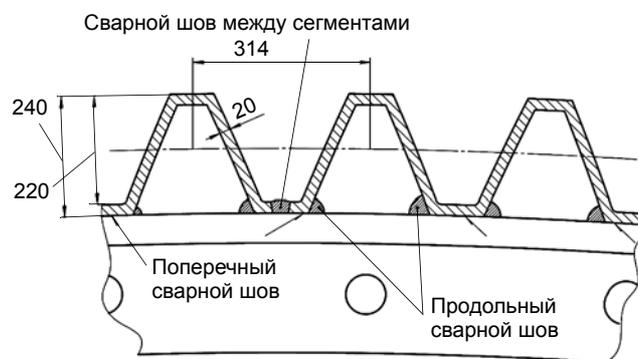
Для реализации данной идеи требуется разработать и изготовить специальное зубогибочное оборудование. При этом технология формирования зубчатого профиля может предусматривать два варианта. В случае применения листового проката (рис. 4) заготовку следует изгибать по всей длине с формирова-



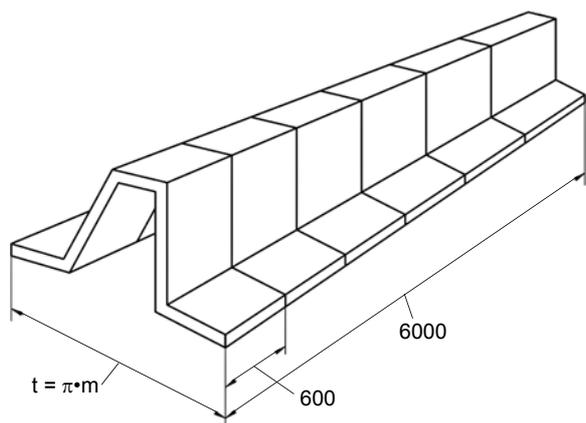
**Рис. 1. Конструкция корпуса крупногабаритной венцовой шестерни, изготовленной сваркой из стального проката:**  $d_{ст}$  — диаметр крепежного отверстия ступицы;  $d_{вп} = m(z - 2,2)$  — диаметр впадин между зубьями;  $d_{н} = m(z + 2)$  — наружный диаметр зубьев (диаметр выступов);  $d_{д} = mz$  — диаметр делительной окружности венца;  $h_1 = m$  — высота ножки зуба;  $h_2 = 1,1m$  — высота головки зуба



**Рис. 2. Конструктивная схема венцовой шестерни с зубчатым венцом из гнутого профиля:** 1 — сварной корпус венцовой шестерни; 2 — места тангенциальных сварных швов; 3 — продольный сварной шов между смежными сегментами зубчатого венца; 4 — гнутый профиль зубчатого венца



**Рис. 3. Схема закрепления гнутого зубчатого профиля на корпусе венцовой шестерни с помощью сварки**



**Рис. 4. Схема гнутого зубчатого сегмента, изготовленного из листового проката**

нием сегмента в виде одного длинного зуба, из которого потом путем разрезки можно получать два и более однозубовых сегмента, свариваемых между собой и прикрепляемые впоследствии к корпусу венцовой шестерни так, как показано на рис. 1.

Другой вариант — это гибка из полосового проката, когда ширина проката соответствует примерно длине будущего зуба, а количество зубьев в формируемом сегменте может быть более одного (предположительно, не менее четырех). В таком случае разрезке и предварительной механической обработке, в том числе разделке, могут быть подвергнуты края гнутого профиля, для получения зубчатого сегмента заданной длины и готового к монтажу на корпус венцовой шестерни.

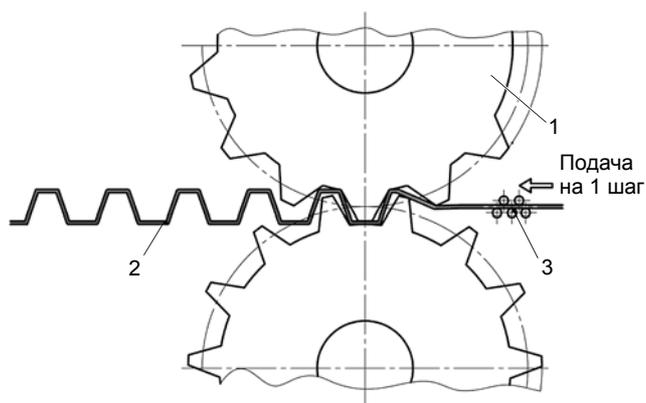
Для относительно мелко модульных венцовых шестерен можно предложить формирование зубчатого профиля с помощью профилегибочной машины (рис. 5), имеющей в своей основе гибочные валки с зубьями, имеющими форму, позволяющую образовать заданные углы изгиба листового или полосового проката в зазоре между зубчатыми валками.

Для крупного зубчатого профиля такая технология формообразования не подходит, так как требует обязательного нагрева и больших деформационных усилий. Оптимальным вариантом будет применение специального профилегибочного пресса (рис. 6), пуансон и матрица которого будут иметь форму, необходимую для образования заданного зубчатого профи-

ля зубчатого сектора и содержащего устройство для предварительного нагрева проката.

Решения, представленные в настоящей статье, призваны кардинально изменить подход к структуре технологического процесса изготовления крупногабаритных венцовых шестерен. Например, для венцовой шестерни с модулем до 100 мм общий производственный процесс будет включать следующие этапы:

1. Нарезание полос из листового проката толщиной 20 мм для зубьев.
2. Гибка полос с формированием зубчатых секторов.
3. Разрезка (при необходимости) на фрагменты или отдельные зубья.
4. Изгиб зубчатых секторов по радиусу корпуса венцовой шестерни.
5. Закалка поверхностей зубьев до HRC 45...50.
6. Раскрой листового проката для элементов корпуса.
7. Сборка и сварка корпуса.
8. Сварка корпуса и зубчатых сегментов.
9. Отжиг корпуса венцовой шестерни (защита зубьев от отжига).
10. Правка (рихтовка) готовой венцовой шестерни (гидродомкратами).
11. Механическая обработка элементов венцовой шестерни (посадочных мест, отверстий, зубьев) с базированием венцовой шестерни относительно делительного диаметра.
12. Приварка торцовых крышек на зубья.



**Рис. 5. Схема формирования гнутого зубчатого сегмента из стального проката на гибочной машине с зубчатыми вальцами: 1 — вальцы с зубчатым профилем специальной формы; 2 — готовый гнутый зубчатый профиль; 3 — механизм подачи исходного проката**

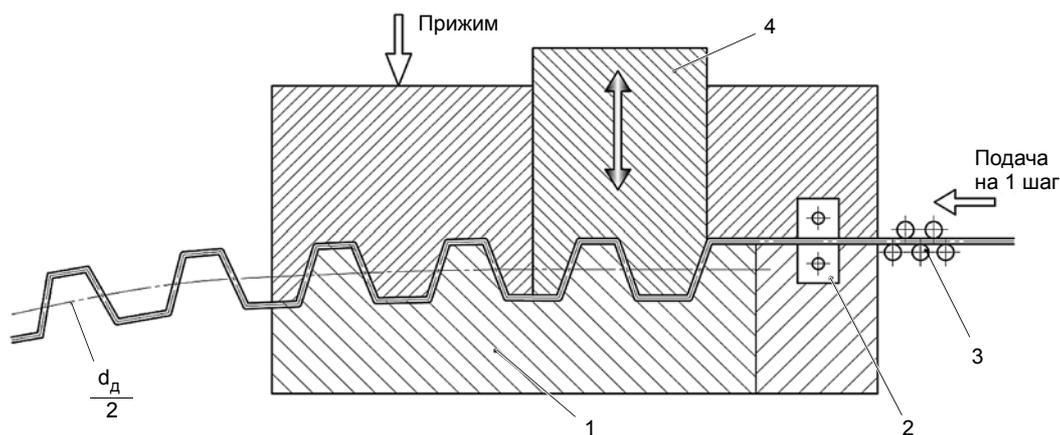


Рис. 6. Схема формирования гнутого зубчатого профиля с использованием специального профилирующего пресса: 1 — матрица; 2 — нагревательный элемент; 3 — механизм подачи; 4 — пуансон;  $t = \pi m$  — шаг зубьев по делительной окружности

13. Заполнение полостей зубьев бетоном или полимером (рис. 7).

Несомненно, оптимальным результатом формирования зубчатых секторов является приобретение их средними линиями кривизны, соответствующей кривизне делительной окружности будущей шестерни (рис. 6). При этом кривизна нижних (базовых) поверхностей гнутого профиля должна соответствовать радиусу поверхности корпуса венцовой шестерни, на которую и должны впоследствии крепиться изготовленные сектора. Однако ввиду того, что наряду с пластической деформацией металла всегда присутствует упругая, профиль зубчатого сектора может отклониться от заданной формы, и радиус кривизны его базовой поверхности  $R_{\text{баз}}$  окажется несколько больше радиуса кривизны установочной поверхности  $R_{\text{уст}}$  корпуса венца (рис. 8), а шаг зубьев может приобрести набегающую погрешность. Это может приводить к тому, что потребуются дополнительный нагрев привариваемого сектора и его последовательный механический прижим от впадины к впадине. Однако такой вариант сборки при неблагоприятных условиях может приводить к формированию набегающего углового шага и как следствие к последующему нарушению в работе зубчатого зацепления.

Для обеспечения качественной сборки деформированного зубчатого сектора предлагается технологическое решение, заключающееся в том, что зубчатый сектор следует изготавливать с заранее наибольшей пластической

деформацией (рис. 9). Это будет способствовать тому, что радиус кривизны базовых поверхностей сектора даже после частичного упругого восстановления будет немного меньше радиуса кривизны опорной поверхности корпуса шестерни. При этом закрепление и приварку зубчатого сектора к корпусу следует на-

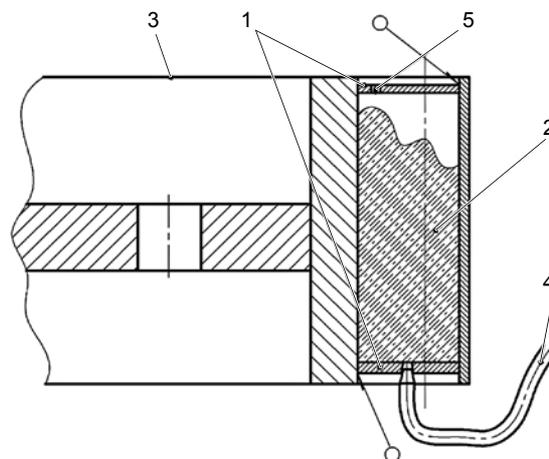


Рис. 7. Схема заполнения полостей зубьев: 1 — приварные крышки; 2 — наполнитель (например, на основе цемента М800); 3 — сварной корпус шестерни; 4 — шланг для подачи наполнителя; 5 — сапун

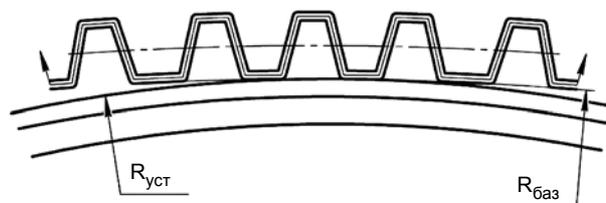


Рис. 8. Схема частичного упругого восстановления зубчатого сектора после снятия формообразующих воздействий

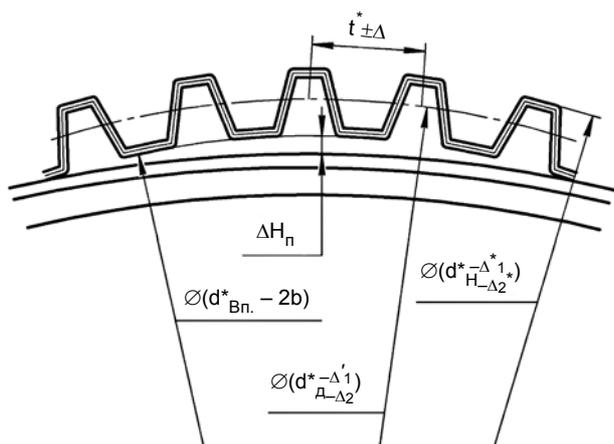


Рис. 9. Схема обеспечения точности сборки корпуса шестерни и зубчатого сектора

чинать с крайних впадин, как это показано на рис. 9. Далее следует приварить среднюю впадину или впадину наиболее близкую к середине зубчатого сектора, а только потом промежуточные (табл. 1).

После окончания сборки зубчатого венца, а также после окончательной механической обработки его рабочих поверхностей следует выполнить тщательный контроль всех параметров зубьев, в том числе величин погрешностей углового шага зубьев. Контроль последней следует осуществлять по длине общей нормали для 3...6 зубьев (в зависимости от величины модуля и числа зубьев в секторе):

$$B_{\min} = 3t = 3\pi m;$$

$$B_{\max} = 6t = 6\pi m.$$

Предложенные технологические решения найдут свое применение не только в стационарных цеховых условиях. Они будут наиболее актуальны в условиях, когда доступ к тяжелому станочному оборудованию ограничен, например в условиях изготовления новых крупногабаритных шестерен на местах их последующей эксплуатации [5].

Таблица 1

Шестерня	$d_H$ $-\delta_{d_H}$	$d_D$ $\pm \delta_{d_D}$	$d_{вп}$ $\pm \delta_{d_{вп}}$	$h_1$ $\pm \delta_{h_1}$	$h_2$ $+\delta_{h_2}$	$t$ $\pm \delta_t$	$H$ $+\delta_H$
Сектор	$d_H^*$ $d_H - b_1$	$d_D^*$ $d_D - b_2$	$d_{вп}^*$ $d_{вп} - b_3$	$h_1^*$ $h_1 - \delta_{h_1}$	$h_2^*$ $h_2 - \delta_{h_2}$	$t^*$ $t - \delta_t$	—
$b_1 = b - \delta_{d_H}; b_2 = b - \delta_{d_D}; b_3 = b - \delta_{d_{вп}}$							

Преимуществом наших решения является высокая экономичность производственного процесса при возможности обеспечения того же уровня качества, как и при обработке в цехах с тяжелым оборудованием. Экономия будет осуществляться за счет сокращения затрат на технологическое оборудование и помещения: вместо нескольких уникальных станков применяются установка для раскроя проката, профилегбочная машина или пресс, печь термообработки и универсальный станкоробот для сварки и механической обработки поверхностей; отсутствие необходимости в гигантском заводском помещении; замена литейного производства сварочным.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенная технология формообразования позволяет изготавливать крупногабаритные диаметром до 20 000 мм и более с модулем до 100...150 мм.
2. Себестоимость изготовленной шестерни с учетом стоимости материалов и живого труда сокращается в 1,5...2 раза.
3. Долговечность и ремонтпригодность шестерни возрастает в несколько раз за счет возможности замены зубьев, при как с демонтажем, так и без демонтажа с вращающегося агрегата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоскутов Ю. А., Максимов В. М., Веселовский В. В. Механическое оборудование предприятий по производству вяжущих строительных материалов: Учебник для техникумов промышленности строительных материалов / М.: Машиностроение, 1986. 376 с.
2. Пелипенко Н. А. Повышение качества крупногабаритных деталей при обработке с использованием переносных станков: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / М.: Московский ордена трудового красного знамени станкостроительный институт, 1988. 42 с.
3. Шурупов В. В., Башкатов А. В., Савичев Е. В., Исаев Р. Р. Двухдуговая автоматическая сварка под флюсом элементов мостовых конструкций // Сварочное производство. 2010. № 2. С. 29—31.
4. Санин С. Н., Квашенкова Г. В., Пелипенко Н. А. Разработка приспособления для прецизионной сварки коллекторов котлоагрегатов / Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 4. С. 117—120.
5. Пелипенко Н. А., Санин С. Н. Технология прецизионного формообразования крупногабаритных пустотозаполненных колец диаметром более 4000 мм // Тяжелое машиностроение. 2016. № 5. С. 34—39.