УДК 669.01.(07)

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ РАСКАТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ РОТОРА АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

**© Мулюков Радик Рафикович [1], Назаров Айрат Ахметович [1], Сухоруков Рафаэль Юрьевич [2], Утяшев Фарид Зайнуллаевич [1]**

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (ИПСМ РАН)*

[2] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)*

info@imash.ru

В статье показано, что формирование в жаропрочных сплавах ультрамелкозернистой структуры (УМЗ) позволяет осуществлять их деформирование в условиях сверхпластичности и, тем самым, управлять структурой материалов, изменять их физико-механические и технологические свойства. Изделия, полученные по этой технологии, могут отличаться высокооднородной микроструктурой во всем объеме и изотропными механическими свойствами или оптимизированной регламентировано-градиентной микроструктурой, учитывающей неравномерное распределение температурно-силовых нагрузок в условиях эксплуатации. Описаны технология и принципы работы оборудования для сверхпластической раскатки дисков газотурбинных двигателей ГТД.

***Ключевые слова***: *ультрамелкозернистая структура, жаропрочные сплавы, сверхпластичность, деформационно-термическая обработка*

## Technological Features of a Process and Equipment for Superplastic Rolling of Axially Symmetric HeatResistant Alloy Components of Rotors for Modern Aircraft Engines

**R. R. Mulyukov[a], A. A. Nazarov[a], R. Yu. Sukhorukov[b], and F. Z. Utyashev[a]**

[a] *Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia*

[b] *Blagonravov Institute of Machine Science, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

It is shown that a formed microcrystal structure allows their deformation under conditions of superplasticity, thereby providing changes in physical and mechanical and processing properties. Parts manufactured by superplastic rolling feature a highly homogeneous microstructure over the entire volume and isotropic mechanical properties or an optimized gradient microstructure allowing for nonuniform temperature and power loading in the process of operation. Technological features of the equipment for superplastic roll forming of discs for motors and requirements for the equipment and the control system are described and methods of calculation of major unit strength are covered.

Keywords: ultrafine grain structure, heat resistant alloys, superplasticity, deformational superplastic rolling.

# Раскатка дисков из жаропрочных сплавов в условиях сверхпластичности

К нанотехнологиям относят процессы обработки материалов, в которых вследствие воздействия на наноразмерные элементы[1] структуры или их создания полуфабрикаты и изделия приобретают высокие технологические и эксплуатационные свойства. С этой точки зрения, технология сверхпластической раскатки дисков из жаропрочных никелевых сплавов может быть рассмотрена как нанотехнология. Жаропрочность этих сплавов обусловлена наноразмерными интерметаллидными частицами. В целях пластического формообразования, на первом этапе посредством деформационно-термической обработки в этих сплавах изменяют состояние наночастиц, укрупняя их до размеров 300-1000 нм, одновременно измельчая зерна матрицы примерно до тех же размеров и меняя структуру границ фаз из когерентной в некогерентную. В результате такого преобразования структуры сплавы при температурах, близких к температуре эксплуатации, теряют жаропрочность и приобретают сверхпластические свойства. Причиной такого кардинального изменения свойств является существенное увеличение расстояния между частицами γ′- фазы и рост протяжённости границ зёрен и фаз, что облегчает как внутризеренную деформацию матрицы, так и проскальзывание по границам зёрен и фаз. Благодаря такому преобразованию структуры жаропрочные сплавы приобретают не только высокую пластичность, но и низкое напряжение течения, что важно для снижения нагрузки на инструмент и мощности деформирующего оборудования [1].

Вторым этапом осуществляют формообразование дисков методом раскатки в условиях сверхпластичности, а в завершение производят термообработку дисков с целью наделения их высокой прочностью и жаропрочностью. Иными словами, зерна матрицы обратно укрупняют, частицы γ′- фазы уменьшают до нанометрических размеров, а межфазные границы преобразуют в когерентные. Таким образом, путём деформационно-термического воздействия достигается управление размерами и характером расположения наноразмерных элементов структуры жапропрочных никелевых сплавов.

Что касается дисковых сплавов на основе титана, для них варьирование микроструктуры от состояния с наноразмерными выделениями α- фазы к состоянию с коагулированными частицами этой фазы с точки зрения возможности обработки давлением[2] не столь важно. Из-за гексагональной кристаллической структуры этой фазы, ограничивающей число систем скольжения дислокаций, деформация этих сплавов сопровождается активным двойникованием. В результате такой «внутренней немонотонности» деформирования пластинчатая структура сплавов преобразуется в глобулярную, что обеспечивает сплавам развитие сверхпластической деформации (СПД). Поэтому пластические свойства этих сплавов даже при наличии исходной наноразмерной пластинчатой структуры остаются высокими. Однако, с точки зрения технологичности деформации, для этих сплавов так же, как и для никелевых сплавов, важно применять заготовки с микрокристаллической (мелкозернистой) структурой, получаемой в результате предварительной деформации, в ходе которой происходит преобразование пластинчатой нанофазы в скоагулированную фазу.

Технологичность материала - это совокупность свойств, обеспечивающих возможность изготовления из него изделий с заданным качеством при минимальных затратах. В процессах обработки металлов давлением (ОМД) технологичность материала, которая может быть

[1] К наноразмерным элементам относят элементы структуры, имеющие хотя бы в одном направлении размер менее 100 нм, например, наноразмерные зерна, упрочняющие наночастицы и т.д.

[2] При окончательной термообработке выделение наноразмерных по толщине α-пластин обеспечивает псевдо α-сплавам высокие механические свойства [1]

высокой или низкой, определяется не только характеристиками пластичности и деформируемости материала, но и рядом других, не менее важных параметров. В их числе - допустимые рамки изменений режимов обработки и их контролируемость. Особенно важной при изготовлении изделий ответственного назначения является гарантированность и надёжная контролируемость структуры и физико-механических свойств, приобретённых материалом в результате деформации. В этом отношении несомненным преимуществом обладают материалы с микрокристаллической структурой, хотя получение таких материалов требует дополнительных трудозатрат.

Ранее было показано [1], что измельчение зёрен даёт различный эффект в улучшении деформируемости для мало-, средне- и сложнолегированных сплавов. Обычно крупнозернистые гетерофазные сплавы с более сложным химическим составом проявляют худшие технологические свойства, причём могут деформироваться в более узком температурном интервале, чем низколегированные сплавы. Для жаропрочных сплавов с микрокристаллической структурой картина существенно меняется: с увеличением в них содержания γ′- образующих элементов температурный интервал для обработки давлением расширяется и повышается их пластичность [2].

Значительно отличаются также возможности обработки крупнозернистых и мелкозернистых сплавов с точки зрения температурно-скоростных интервалов деформации.

Для большинства процессов обработки давлением характерно неравномерное распределение деформации, что обусловлено как самой природой процесса деформации кристаллических материалов, так и особенностями операций формообразования, в которых обычно невозможно обеспечить равные величины и скорости деформации различным частям заготовки. В традиционных процессах также невозможно поддерживать постоянную и одинаковую температуру в разных частях деформируемой заготовки [3].

Неравномерность деформации заготовок из жаропрочных сплавов при формообразовании деталей часто становится причиной отбраковки последних из-за получаемой вследствие этого неоднородной структуры и свойств. Поэтому в традиционных процессах горячей деформации, включая изотермическую, количество операций формообразования регламентируется не только исходя из ресурса пластичности материала, но и с учётом необходимости более или менее однородного распределения деформации в различных участках заготовки. В результате увеличивается число операций, потери металла в отходы, повышаются трудоёмкость и затраты кузнечного производства.

Особенность СПД, основным механизмом которой является зернограничное проскальзывание [1], заключается в том, что она не приводит к изменению мелкозернистой структуры деформированного материала. Иначе говоря, структура деформированных в условиях СПД материалов не зависит от степени деформации, а зависит только от скорости и температуры деформации. В том случае, если температура и скорость деформации соответствуют режиму СПД, структура остаётся стабильной и по размерам, и по форме зёрен и характеризуется низкой, как в хорошо отожженном металле, плотностью дислокаций.

Особенностью самого процесса раскатки является неравномерное деформирование заготовки по участкам. Так, в зоне ступицы материал диска практически не деформируется, в полотне и ободе он подвергается деформациям, эквивалентным δ=200-300% и 50-100%, соответственно. Тем не менее, размеры зёрен матрицы и интерметаллидной фазы во всем объёме раскатанного крупногабаритного диска диаметром около 600 мм практически одинаковы. Данные измерений среднего размера зёрен матрицы и γ′- фазы в диске из сплава ЭП962, изготовленного раскаткой свидетельствуют о высокой степени однородности структуры материала, подвергнутого СПД.

Наличие однородной микрокристаллической структуры в деталях, изготовленных в условиях СПД, позволяет, в сочетании с термообработкой, расширить рамки варьирования механических свойств сплавов и получать таким образом изделия с регламентированными

свойствами. В частности, как было отмечено выше, изменение свойств никелевых сплавов от жаропрочных к сверхпластическим и наоборот связано с измельчением и укрупнением зёрен матрицы, соответственно. Измельчение зёрен достигается деформацией, а укрупнение - термообработкой. Поскольку изделия из жаропрочных никелевых сплавов могут эксплуатироваться в достаточно широком интервале температуры и времени, то каждому характерному условию эксплуатации наилучший комплекс требуемых механических свойств может обеспечивать структура с определённым размером зёрен [6].

На основании изложенных выше фундаментальных и прикладных исследований свойств жаропрочных сплавов в условиях сверхпластичности могут быть сформулированы следующие требования к раскатному оборудованию.

Оборудование должно обеспечивать:

- формообразование методом горячей изотермической раскатки осесимметричных деталей типа дисков, колец из мелкозернистых жаропрочных сплавов на основе титана, никеля и железа;
- изотермические условия деформации при температурах 700-1150$^{o}$C;
- основные узлы и механизмы должны обеспечивать величины усилия и скорости деформации, достаточные для деформирования современных жаропрочных сплавов на основе никеля, в частности, максимальное усилие на раскатном ролике до 50 тс, скорость перемещения ролика относительно заготовки в радиальном направлении от 1,2 до 20 мм/мин;
- управление процессом формообразования и контроль его параметров, в первую очередь, усилия и скорости деформации, по заданной программе;
- раскатку дисков диаметром до 800 мм.

## Стан СРЖД-800

Для реализации технологии раскатки дисков из жаропрочных сплавов диаметром до 800 мм разработан и изготовлен стан СРЖД-800 (рис. 1), отвечающий требованиям технического задания (Госконтракт в рамках ФЦП «Национальная технологическая база», заказчик Минпромторг РФ). Для раскатки используются мелкозернистые заготовки в виде шайбы диаметром до 350 мм и универсальный инструмент – ролики. Формообразование деталей на стане осуществляется системой управления как в автоматическом, так и полуавтоматическом режимах. Упрощённая кинематическая схема разработанного стана представлена на рис. 2. Стан состоит из отдельных кинематических цепей, связанных с раскатными роликами или заготовкой и обеспечивающих им требуемые перемещения и технологические усилия [7].

Вращение заготовки обеспечивается одним или двумя приводами, состоящими из редуктора с передаточным отношением 1/1000 и электродвигателя. Для разрабатываемого стана используется электродвигатель общепромышленный трёхфазный асинхронный, мощностью 11 кВт, модели АИР132М2У3 11/3000 IM3081. Данная кинематическая цепь обеспечивает вращение шпинделя со скоростью от 0,07 до 7 об/мин и создаёт на нем максимальный крутящий момент до 6,0 тс·м.

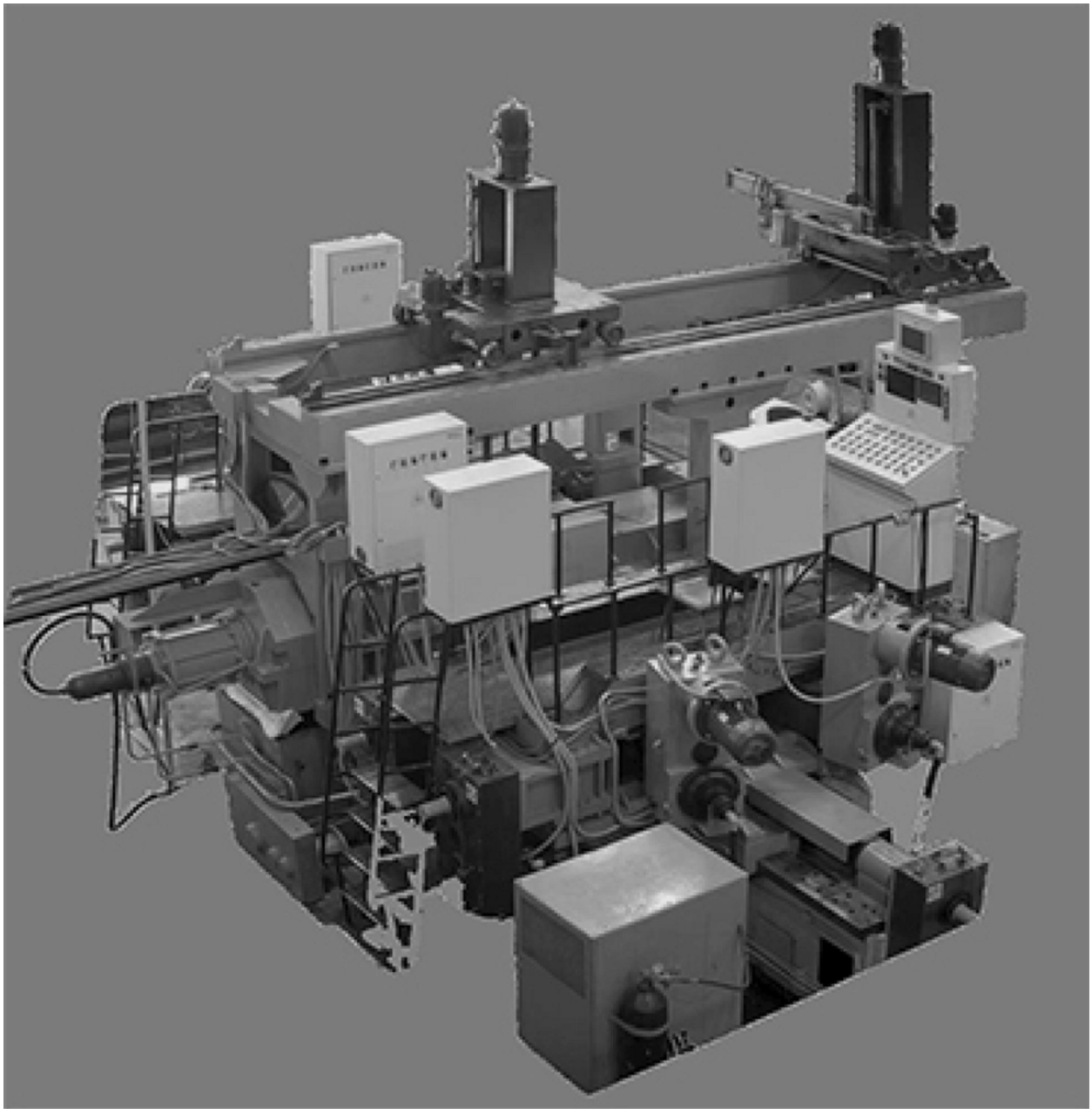


**Рис. 1.** Стан СРЖД-800

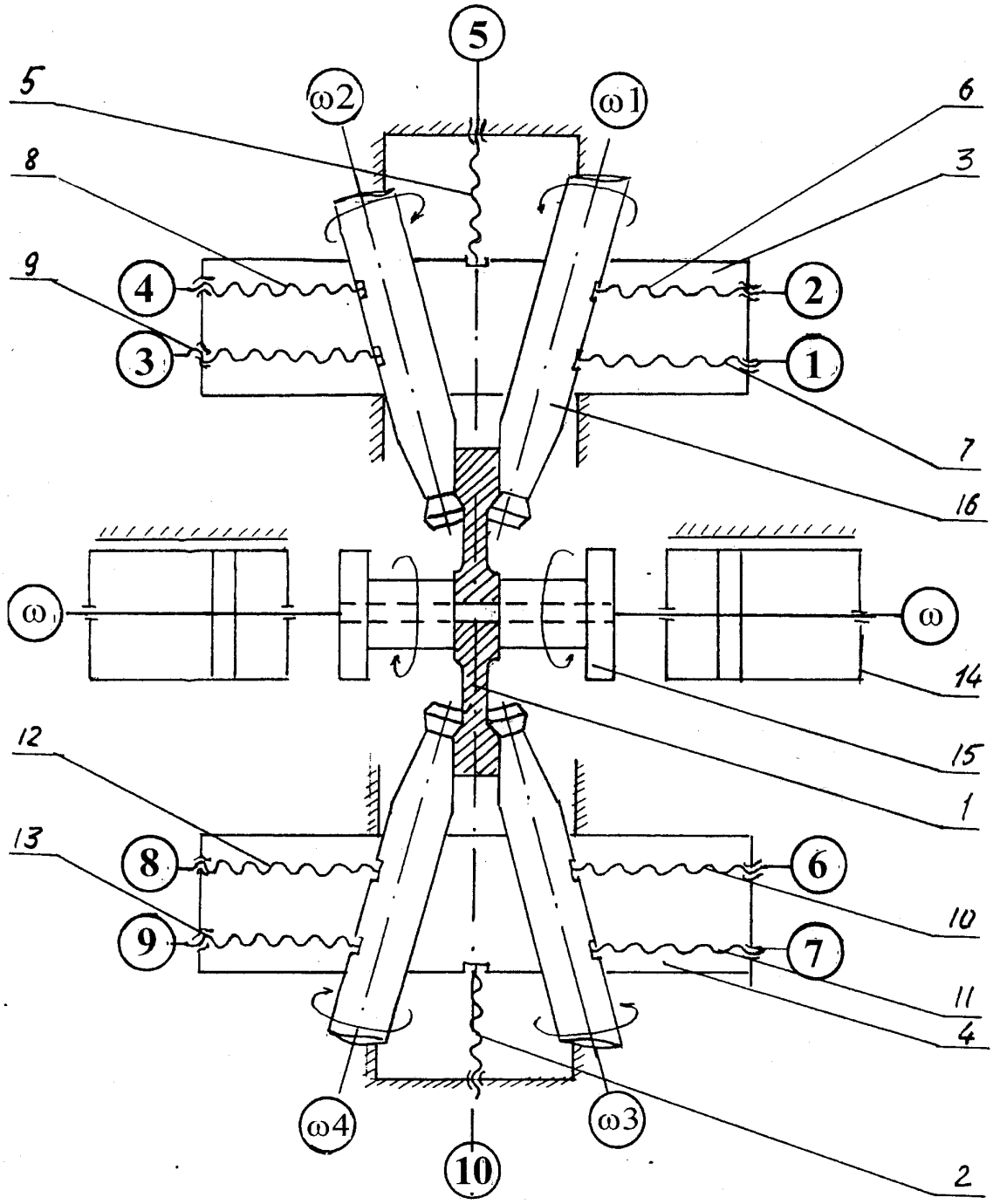



**Рис. 2**. Кинематическая схема раскатного стана СРЖД-800.

Вращение заготовки обеспечивается одним или двумя приводами, состоящими из редуктора с передаточным отношением 1/1000 и электродвигателя. Для разрабатываемого стана используется электродвигатель общепромышленный трёхфазный асинхронный, мощностью 11 кВт, модели АИР132М2У3 11/3000 IM3081. Данная кинематическая цепь обеспечивает вращение шпинделя со скоростью от 0,07 до 7 об/мин и создаёт на нем максимальный крутящий момент до 6,0 тс·м.

Зажим заготовки (1) осуществляется шпинделями (14,15), имеющими возможность перемещаться в осевом направлении от гидроцилиндров с усилием до 23 тс.

Вращение раскатных роликов обеспечивается приводами ω1, ω2, ω3 и ω4, каждый из которых состоит из редуктора с передаточным отношением 1/100 и электродвигателя. Для стана используются два типа двигателей. Для раскатных формообразующих роликов используется электродвигатель общепромышленный трёхфазный асинхронный, мощностью 15 кВт, модели АИР160 М6У2 15/1000 IM3081. Для вспомогательных роликов, обеспечивающих поддержку заготовки в процессе раскатки, используется электродвигатель общепромышленный трёхфазный асинхронный, мощностью 11 кВт, модели АИР132М2У3 11/3000 IM3081. Данные кинематические цепи обеспечивают вращение роликов в диапазоне от 1 до 40 об/мин и создают регулируемый крутящий момент до 1 тс·м.

Поперечное перемещение раскатных роликов осуществляется приводами 1 – 4, 6 – 9, состоящими каждый из редуктора с цилиндрическими зубчатыми колесами с общим передаточным отношением i=100 и асинхронного электродвигателя АИР132М6У2 с номинальным числом оборотов n=2000 об/мин и мощностью P=7,5 кВт. Выходные шестерни редукторов через валы муфтами гайки связаны с нажимными винтами. Все винтовые пары соединяются с корпусами раскатных роликов шарнирно, благодаря чему обеспечивается возможность поступательного поперечного перемещения раскатных роликов и изменение наклона ролика относительно плоскости диска. С входным валом безлюфтовым соединением связан повышающий редуктор с передаточным отношением i=2,5, на котором установлен датчик обратной связи. С выходным валом редуктора также безлюфтовым соединением связан понижающий редуктор с передаточным отношением i=2, на котором установлен датчик обратной связи. Данные кинематические цепи обеспечивают поперечное перемещение раскатных роликов со скоростью 1,2…20 мм/мин и создают на рамках усилия внедрения в тело заготовки до 50 тс.

Продольное перемещение кареток раскатных роликов осуществляются приводами 5 и 10, каждый состоит из редуктора с передаточным отношением 1/100 и электродвигателей. Выходной вал редуктора через муфту соединён с винтовыми парами, которые обеспечивают возвратно-поступательное перемещение раскатных кареток. Для этого также используются электродвигатели общепромышленные трёхфазные асинхронные, мощностью 7,5 кВт, модели АИР132 М6У2 7,5/1000 IM3081. Кинематическая цепь обеспечивает перемещение кареток со скоростью 1,2…20 мм/мин.

На рис. 3 представлена схема расположения на чертеже (общий вид) основных составных частей раскатного стана СРЖД – 800, электрошкафов и элементов системы управления:

- станина (1,2);
- каретка раскатная левая (3) и правая (4);
- шпинделя (9) с приводом и гидроцилиндрами зажима заготовок – 2 шт;
- насосная станция (6) (гидростанция);
- нагревательная печь (10);
- раскатные головки (5) – 4 шт.;
- электроприводы раскатных головок (7) с редукторами и электродвигателями АИР132 М6У2 7,5/1000 IM3081 – 8 шт.;

- электроприводы шпинделей (8) с редукторами и электродвигателями АИР132М2У3 11/3000 IM3081 – 2шт.;
- гидроцилиндры сжатия пинолей (11) – 2 шт.;
- электроприводы перемещения кареток (12) с редукторами, ходовыми винтами (13) и электродвигателями АИР132 М6У2 7,5/1000 IM3081 – 2 шт.;
- Вводной силовой шкаф электропитания (14);
- Электрошкаф регулятора мощности электропечей 2×20 кВт (15);
- Пульт управления (16) в составе: стойка пульта управления, панель управления и консоль пульта управления;
- Электропривод перемещения раскатных головок (17), комплектный шкаф частотного преобразователя КШЧ-7,5-2 – 4 шт.;
- Электропривод перемещения кареток раскатных роликов (18), комплектный шкаф частотного преобразователя КШЧ-7,5 – 2 шт.;
- Электропривод каретки раскатной левой (основной, формообразующей) (19), комплектный шкаф частотного преобразователя КШЧ-15;
- Электропривод каретки раскатной правой (вспомогательной, поддерживающей) (20), комплектный шкаф частотного преобразователя КШЧ-11;
- Электропривод шпинделей (21), комплектный шкаф частотного преобразователя КШЧ-11;

Нагревательная печь 10 (рис. 3) состоит из 2 частей – нижней и верхней части – крышки. Верхняя часть печи при загрузке заготовки диска поднимается манипулятором. Обе части печи оборудованы собственными комплектами резистивных нагревательных элементов, каждая суммарной мощностью по 20 кВт. Печь обеспечивает нагрев до 1200□С по заданному режиму. Масса нагреваемых заготовок - до 50 кг. Мощность печи Р=42 кВт, время нагрева заготовки до заданной температуры при Рполн.=40 кВт составляет около 3 часов.

В каждой части печи смонтированы по одной регулирующей и одной контрольной термопаре. Регулировка мощности нагрева осуществляется посредством регулятора мощности. Управление и контроль нагрева осуществляет контроллер нижнего уровня модели DVP10SX11R.

## Автоматизированная система управления стана СРЖД-800

АСУ раскатного стана СРЖД-800 выполнена в виде многоуровневой, распределённой системы управления [10]. На верхнем уровне расположены контроллеры, управляющие ходом технологического процесса в целом и обеспечивающие человеко-машинный интерфейс (HMI).

На среднем уровне расположены контроллеры, в реальном времени выполняющие вычисление параметров скорости роликов и шпинделей и обеспечивающие синхронизацию их работы, а также корректировку скоростей перемещения раскатных головок в зависимости от изменения нагрузок на роликах.

На нижнем уровне расположены PLC-контроллеры, в векторном режиме управляющие скоростями вращения электродвигателей шпинделей и роликов, а также выполняющие функцию контроля качества их электропитания, допустимости токов, моментов на валу и температур. Управление перемещением кареток и раскатных головок выполняют PLC-контроллеры, дополнительно укомплектованные энкодерами и счётчиками. Данные контроллеры в векторном режиме управляют скоростями и фактической величиной перемещения кареток и раскатных головок, а также выполняют функцию контроля качества их электропитания, допустимости токов, моментов на валу и температур электродвигателей.

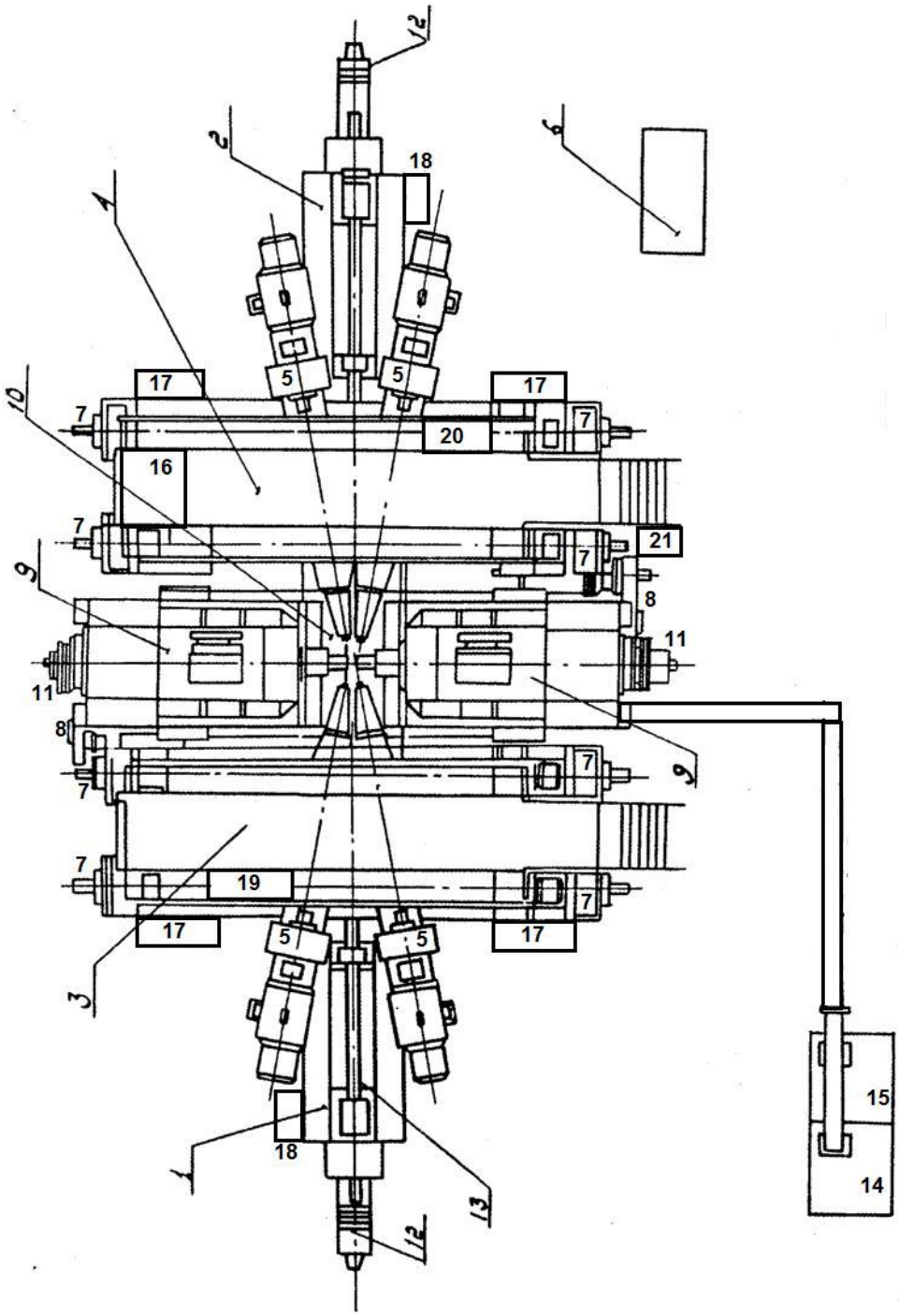



**Рис.3**.Схема размещения основных узлов и элементов системы управления стана в СРЖД-800.

Управление технологическим процессом раскатки и вспомогательными операциями производится оператором посредством пульта управления. На пульте управления установлены 2 дисплея:

- HG1 – дисплей «Управление технологическим процессом раскатки» (операторская панель 10’’) типа DOP-B10S615, который позволяет осуществлять контроль хода технологического процесса, представленного в виде мнемосхем, графиков и цифровых значений, а также ввод исходных параметров технологического процесса раскатки;

- HG2 – дисплей «Инженерный контроль» (операторская панель 7’’), типа DOP-B07S201, который в режиме реального времени отображает в виде мнемосхем, графиков и численных значений предустановки и фактические значения инженерных параметров, а также информирует оператора об их отклонениях и аварийных ситуациях.

Программная реализация обмена данных производится посредством протокола обмена данных Modbus RTU. Контроллер верхнего уровня U18 является ведущим (мастером сети). Обмен данными всегда инициализируется им. Все контроллеры АСУ имеют уникальные сетевые адреса. Для запроса данных или передачи команд управления ведущее устройство может посылать запросы всем устройствам одновременно (широковещательный режим) или только одному конкретному устройству по его уникальному адресу.

Такая организация взаимосвязи элементов системы управления позволяет кардинально уменьшить количество линий связи внутри АСУ, упростить и сократить количество кабелей связи, легко добавлять в неё дополнительные контроллеры и другие элементы и при необходимости организовать связь со смежными системами, например, автоматизированными рабочими местами инженеров-технологов.

Система функционирует в четырёх основных режимах: «ручной», «наладка», «полуавтомат» и «автомат».

## Определение основных силовых параметров стана по отношению к усилию раскатки в очаге деформации

При разработке и изготовлении стана СРЖД-800 были проведены силовые расчёты основных узлов, которые должны обеспечить заданные термомеханические параметры процесса раскатки. Особое внимание было уделено получению зависимостей усилия раскатки от конструкции раскатной головки, т.е. сил - реакций в её опорах, соотношения моментов вращения шпинделя пиноли крепления заготовки и момента вращения раскатного ролика от геометрических параметров инструмента – раскатного ролика.

Основные узлы стана, обеспечивающие процесс раскатки представлены на рис. 4.

Определение основных усилий механизма Fy и Fz, зависящих от силы давления металла на ролики $P_{Раск}$ сводится к задаче по определению сил-реакций в опорах ролика раскатного.

На рисунке 5 представлена схема для расчёта реакций в опорах 1 и 2 ролика раскатного. В опоре 1 имеет место только реакция $R1_Z$, направленная вдоль оси Z, поскольку корпус ролика раскатного устанавливается в составной опоре скольжения, где опора 1 свободно перемещается в направляющих по оси Z, в тоже время корпус может перемещаться вдоль своей оси в опоре 1. В опоре 2 корпус ролика устанавливается на цапфах и может поворачиваться, меняя угол $\alpha$. При этом опоры 1 и 2 имеют винтовые приводы, обеспечивающие поступательное перемещение.

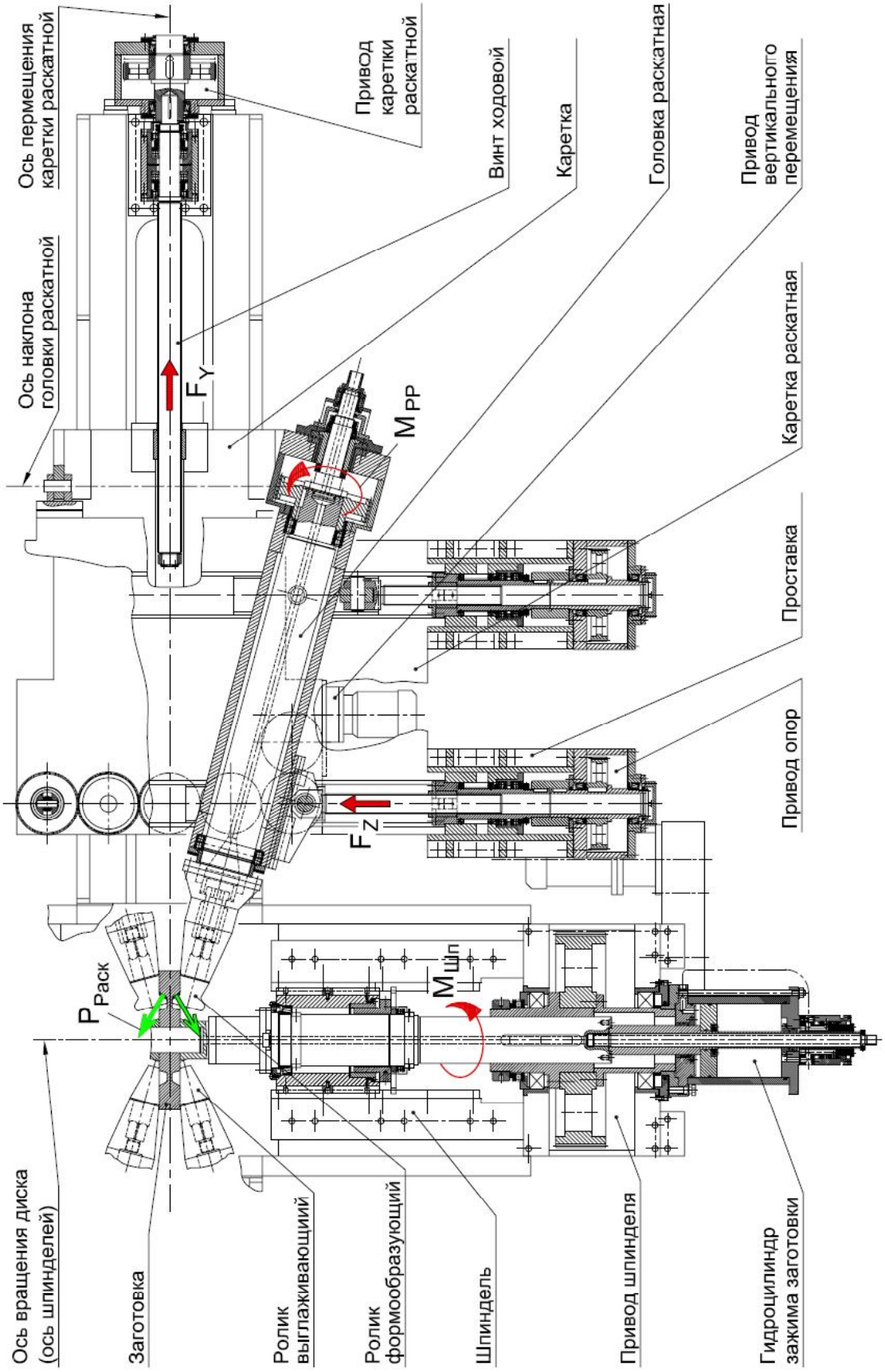



**Рис. 4**, – Рисунок 4. – Основные узлы, обеспечивающие процесс раскатки: пиноли зажима заготовки, шпиндель, обеспечивающий вращение заготовки, раскатная головка со шпинделем и приводами опор, каретка с приводом.

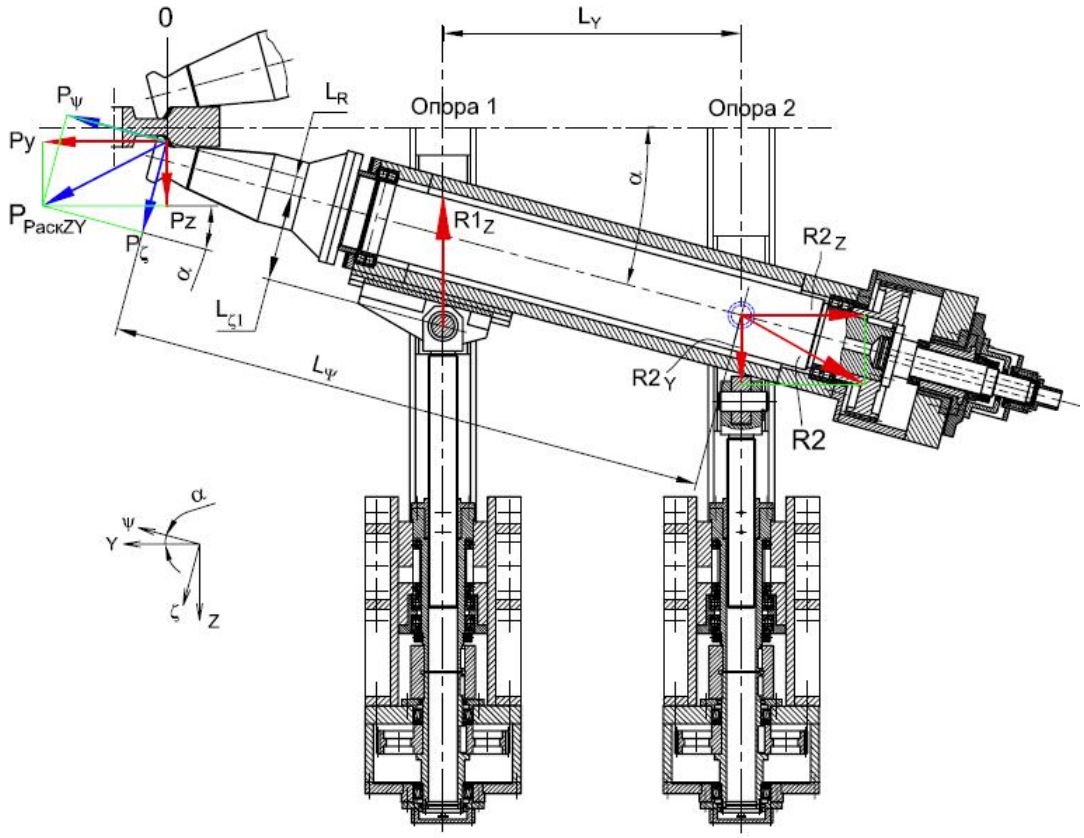



**Рис.5.** Схема по определению реакций опор ролика раскатного

Система координат ψ, ζ – повёрнута относительно Y, Z на угол α.

$P_Y$, $P_Z$, $P_\psi$, $P_\zeta$ – проекции силы $P_{Раск}$ на соответствующие оси.

$R1_Z$, $R2_Y$, $R2_Z$ – проекции реакций в опорах 1 и 2.

Соотношение проекций сил раскатки в рассматриваемых системах координат:

$P_Z = - P_{□} \cdot \sin(□) + P_{□} \cdot \cos(□)$

$P_Y = P_{□} \cdot \cos(□) + P_{□} \cdot \sin(□)$

Система уравнений для определения реакций в опорах 1 и 2.

$$\begin{cases} R1_Z \cdot L_Y = P_\zeta \cdot L_\psi + P_\psi \cdot L_R \\ R2_Z = R1_Z - P_Z \\ P_Z = P_\zeta \cdot \sin(\alpha) - P_\psi \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (1)$$

При сопоставлении основных сил механизма обеспечивающих раскатку и реакций в опорах 1 и 2 имеем следующие соотношения по определению основных усилий:

$F_Y = R2_Y = 2 \cdot P_Y$

$F_Z = R_{1Z}$ или: $F_Z = \dfrac{P_\zeta \cdot L_\psi + P_\psi \cdot L_R}{L_Y} =$

При расчёте сил $F_Y$ и $F_Z$, обеспечивающих необходимое усилие раскатки, рассмотренным выше методом допускается, что механическая система ролика раскатного рассчитывается методами решения линейных задач статики. То есть, прогиб нагруженного силой раскатки конца ролика раскатного не учитывается.

## Влияние геометрических размеров раскатного ролика – инструмента на усилие раскатки

Конструктивно рабочая часть роликов представляет собой сочетание трёх усечённых конусов: начального, среднего и концевого (рис. 6.) Основную деформацию при раскатке заготовки осуществляет средний конус ролика. Концевой конус осуществляет калибровку полотна диска и препятствует течению материала в обратном к раскатке направлении. Начальный конус предназначен для обжатия торцевых поверхностей обода.

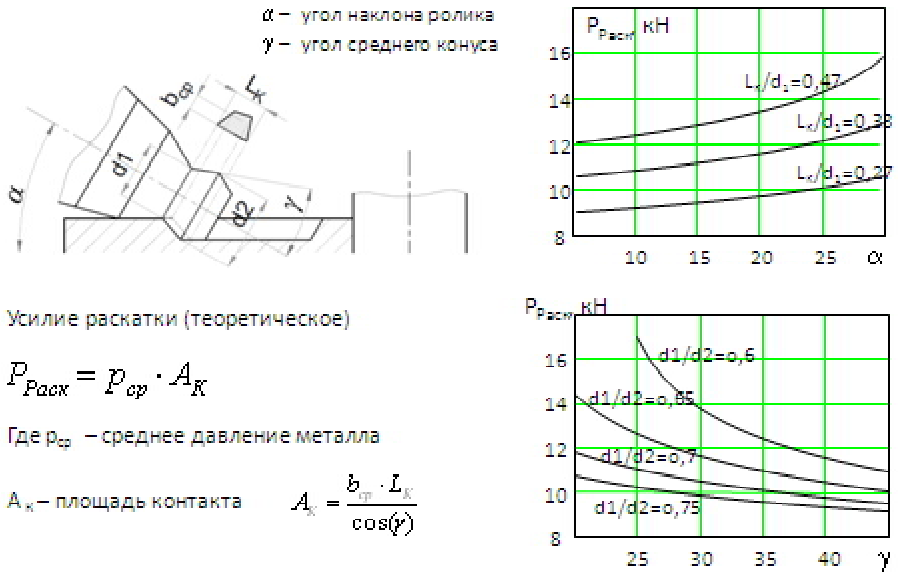



**Рис.6.** Влияние геометрии инструмента на силовые параметры раскатки.

Конфигурация и размеры этих частей ролика определяют обжатие заготовки за один оборот заготовки. Сопряжение наклонных роликов с вращающейся заготовкой происходит по поверхности, являющейся пятном контакта очага деформации. Параметры пятна контакта связаны с геометрическими размерами и пространственным расположением ролика по отношению к заготовке.

В работе решена задача выбора оптимального расположения ролика по отношению к плоскости прокатки и угла его среднего конуса при раскатке с целью наибольшей деформации при минимальной площади поверхности. Было установлено, что для обеспечения максимального обжатия при минимальной площади поверхности пятна контакта необходимо, чтобы половина угла γ при вершине среднего конуса была меньше угла наклона оси ролика к плоскости прокатки α (см. рис. 6). Выполнение этой рекомендации для раскатки дисков в условиях СПД привело бы к увеличению угла наклона роликов γ и осложнило конструктивное исполнение печи и инструментального узла в целом. Поэтому с учётом особенности раскатки в условиях сверхпластичности и из конструктивных соображений в стане СРЖД-800 применяются ролики с $\gamma = 30 \div 45^{o}$, угол наклона которых α может меняться практически от 0 до $15 \div 20^{o}$ по отношению к плоскости раскатки.

В то же время с увеличением диаметра роликов возрастают площади контакта и усилие деформации. Принимая во внимание то, что при раскатке в условиях СПД влияние схемы напряжённого состояния на деформируемость материала не столь существенно, как при обычной деформации, диаметральные размеры инструмента определили из условия прочности и достаточной жёсткости при раскатке. На рис. 6 показано, что геометрия ролика оказывает влияние на величину области контакта заготовки и инструмента, от которой

зависит усилие раскатки. При этом рассматривается случай установившегося процесса деформации от центра заготовки к периферии. Длина и ширина контакта определяются геометрически без учёта упругого сплющивания ролика и наплыва металла.

Полное усилие раскатки необходимо учитывать принимая во внимание локальность очага деформации и влияние на него внешних зон. В первом приближении максимальное усилие модно определить по формуле

$$P_{мах} = n\, P_{раск}$$

где n – коэффициент, учитывающий напряженное состояние в очаге деформации. Согласно [1], при сверхпластической деформации этот коэффициент можно принять равным n = 2-3. Отсюда для типовых размеров инструмента и расположения роликов получим $P_{мах} = 16 \times 3 =$ 48 тс.

## Заключение

1. В работе была изложена концепция управления микроструктурой жаропрочных сплавов, применяемых для изготовления газотурбинных двигателей, путем деформационно-термической обработки, обеспечивающей сплавам высокую технологичность на этапе обработки и работоспособность в условиях эксплуатации.

2. Приведены основные конструктивные решения и требования к оборудованию для локального формообразования деталей в условиях сверхпластичности на примере опытного образца стана СРЖД 800.

3. Получены аналитические зависимости для определения площади пятна деформации и нагрузок при раскатке дисков, использованные при проектировании силовых узлов стана и автоматической системы управления процессами раскатки натурных дисков диаметром от 450 до 850 мм на опытном образце стана СРЖД 800.

## Список литературы

1. Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z. Superplasticity: microstructural refinement and superplastic roll forming. - Arlington, Virginia, USA: Futurepast, 2005, 386 p.
2. Superplastic roll forming of Ti alloys / B.P. Bewlay, M.F.X. Gigliotti, F.Z. Utyashev, O.A. Kaibyshev // Materials and Design. 2000. V. 21, p. 287-295.
3. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В.К. Александров, Н.Ф. Аношкин, Г.А. Бочвар, М.Я. Брун и др. – М: Металлургия, 1975, с. 519.
4. Брун М.Я., Евменов О.Л., Каганович Н.И. Улучшение структуры заготовок их двухфазных титановых сплавов путём предварительной деформации в (α+β)-области и окончательной обработки при температуре β-области / ТЛС. – 1978, № 6, с. 43-47.
5. Ротационный метод и стан для изготовления дисков газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов / Ф.З. Утяшев, Р.Ю. Сухоруков, В.Л. Афонин, Р.Р. Мулюков, А.А. Назаров // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012, № 1, с. 109-116.
6. Утяшев Ф.З., Бурлаков И.А., Гейкин В.А., Морозов В.В., Мулюков Р.Р., Назаров А.А., Сухоруков Р.Ю. Научные основы высокоэффективной технологии раскатки осесимметричных деталей ротора газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов. /Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2013, № 5, с. 96-105.
7. Разработка оборудования для формообразования деталей из жаропрочных сплавов на основе титана и никеля методами пластической деформации. Отчёт (заключительный) № 02201360619 от 29.07.2013г. о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе по госконтракту от 07 октября 2011 г. № 11411.1003704.05.028, шифр «Пластика».