



УДК 621.81

Поступила 16.09.2021

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОЛЬЦЕРАСКАТНОГО КОМПЛЕКСА

*В. Е. АНТОНЮК, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12*

*В. В. РУДЫЙ, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-Холдинг», г. Жодино, Беларусь*

*С. Г. САНДОМИРСКИЙ, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sand\_work@mail.ru*

*Обобщены материаловедческие и технологические процессы производства изделий с использованием кольцеракатки. Проведенный анализ оборудования автоматизированной кольцеракатной линии показал, что она является сложным и дорогим техническим решением. Организация работы линии с максимальной эффективностью в задачи поставщика не входит. Определены требования для максимальной загрузки и эффективной работы линии.*

*Показано, что использование опыта создания производств железнодорожных колес при создании автоматизированного производства кольцевых заготовок невозможно из-за необходимости обеспечить производство колец разной формы из разных марок сталей с разным температурным диапазоном пластического деформирования и с разными программами выпуска. Это требует использования разного соотношения радиальных и осевых усилий кольцеракатки, разного технологического оснащения, учета разных жесткости колец и их склонности к деформациям при обработке, транспортировке и охлаждении, разработки средств механизации для переналадок.*

*Заранее отработать все технологические варианты производства колец разных размеров на автоматизированной линии невозможно. Для технологического обеспечения комплекса необходимо разработать технологическое и программное обеспечение процессов изготовления каждого кольца, предусмотреть возможность корректировки технологических процессов непосредственно на автоматизированной линии с участием операторов. На этой основе поставлены задачи технологического обеспечения работы автоматизированного кольцеракатного комплекса на Белорусском автомобильном заводе.*

**Ключевые слова.** Кольцевая заготовка, нагрев, прессование, раскатка, моделирование, пластическое деформирование.

## TECHNOLOGICAL TASKS OF ENSURING THE OPERATION OF AN AUTOMATED RING-ROLLING COMPLEX

*V. E. ANTONYUK, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str.*

*V. V. RUDY, OJSC “BELAZ” – Management Company of the Holding “BELAZ-Holding”, Zhodino, Belarus*

*S. G. SANDOMIRSKY, “Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus”, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sand\_work@mail.ru*

*The material science and technological processes of production of products using a ring roller are generalized. The analysis of the equipment of the automated ring-rolling line showed that it is a complex and expensive technical solution. Organizing the operation of the line with maximum efficiency is not part of the supplier's tasks. The requirements for maximum loading and efficient operation of the line are defined.*

*It is shown that the use of the experience of creating railway wheel productions when creating automated production of ring blanks is impossible due to the need to ensure the production of rings of different shapes from different grades of steel with different temperature ranges of plastic deformation and with different production programs. This requires the use of a different ratio of radial and axial forces of the ring roller, different technological equipment, taking into account different ring stiffness and their tendency to deformation during processing, transportation and cooling, the development of mechanization tools for changeovers. It is impossible to work out all technological options for the production of rings of different sizes on an automated line in advance. For the technological support of the complex, it is necessary to develop technological and software for the manufacturing processes of each ring, to provide for the possibility of adjusting technological processes directly on the automated line with the participation of operators. On this basis, the tasks of technological support of the automated ring-rolling complex at the Belarusian Automobile Plant are set.*

**Keywords.** Ring blank, heating, pressing, rolling, modeling, plastic deformation.

Кольцераскатка позволяет создать ответственные детали машиностроения с высокими точностью и механическими свойствами [1–5]. Уже освоена кольцераскатка деталей диаметром до 15 м, высотой до 3,5 м и массой до 30 т. В Европе работает более 30 кольцераскатных производств. Но лишь две линии для производства заготовок подшипников являются автоматизированными: линия компании ОВАКО (Швеция) с диаметром колец  $D$  до 1200 мм и линия на Минском подшипниковом заводе с  $D$  до 600 мм [5]. В 2021 г. планируется закупка технологии и оборудования автоматизированной линии для изготовления кольцевых заготовок для Белорусского автомобильного завода. Ее особенность – управление технологическим процессом без вмешательства операторов (им отводится роль наблюдения и вмешательства в процесс только при необходимости).

Автоматизированная линия является дорогим техническим решением и после приобретения необходимо организовать ее работу с максимальной эффективностью и загрузкой. Опыт эксплуатации оборудования для кольцераскатки является ноу-хау фирм, поставляющих это оборудование. Они не делятся этой информацией с заказчиками. Проведенный анализ отечественных и зарубежных источников о методах получения кольцевых заготовок показал, что необходима не только закупка современного оборудования, но и разработка научных основ технологии кольцераскатки применительно к решению задач, поставленных перед создаваемым в Республике Беларусь автоматизированным кольцераскатным комплексом.

**Цель доклада** – обобщение материаловедческих, физических и технологических процессов кольцераскатки, анализ оборудования автоматизированной кольцераскатной линии и постановка на этой основе задач технологического обеспечения работы автоматизированного кольцераскатного комплекса на Белорусском автомобильном заводе.

#### Физические и материаловедческие основы кольцераскатки

Технология изготовления раскатанных бесшовных колец включает в себя операции резки заготовок, нагрева, осадки, наметки отверстия, прошивки отверстия, кольцераскатки. При разработке технологий кольцераскатки используют основные положения пластического деформирования материалов [6–11], которое начинается с теплового преобразования свойств материала [12]. Для этого используют разные виды оборудования для нагрева. Пластическое деформирование нагретого материала проводят на кузнечно-прессовом оборудовании. При кольцераскатке деформирование и течение материала аналогично процессу прокатки. Обязательным является соблюдение условий течения материала без образования трещин и напряжений. При правильном выборе схемы течения материала и соотношения усилий деформирования и пластичности можно достичь улучшения структуры материала и механических свойств детали. Наиболее перспективные процессы пластического деформирования – это процессы с многократным нагружением, к которым относятся радиальная (рис. 1, а) и радиально-осевая (рис. 1, б) кольцераскатки [13, 14].

Неподвижно закрепленный главный валок вращается с постоянным числом оборотов, в то время как дорновой валок имеет привод вращения с регулируемой частотой вращения. Диаметр дорнового валка всегда меньше диаметра главного валка и делается по возможности минимальным для сокращения затрат на получение предварительного отверстия на заготовке под кольцераскатку. Частота вращения конических осевых валков также регулируемая. Кроме главного, дорнового и конических валков для реализации кольцераскатки используются центрирующие устройства, системы приводов и подачи.

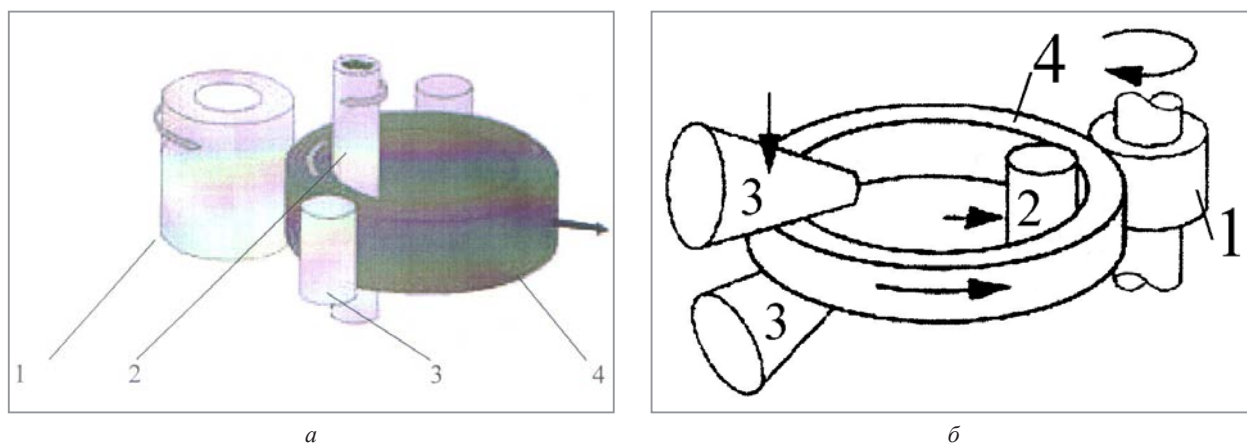


Рис. 1. Радиальная (а) и радиально-осевая (б) кольцераскатка:

1 – главный валок; 2 – дорновой валок; 3 – центрирующие валки; 4 – кольцо

В автоматизированной линии выполняются операции резки, нагрева, пластического деформирования на прессе и кольцераскатном стане, операции перемещения, контроля, охлаждения, маркирования. Кольцевые заготовки, находящиеся в температурном диапазоне от 1250 °С до холодного состояния 60 °С, подвергаются деформированию как в процессе обработки, так и при перемещении и охлаждении. По конфигурации кольцевые заготовки имеют форму дисков, колец, гильз. По сечению профиля используют преимущественно прямоугольный профиль, но закладываются требования и для изготовления колец со сложным профилем на наружном и внутреннем диаметрах.

При разработке процесса кольцераскатки профильных колец учитывают, что при радиально-осевой кольцераскатке происходит искажение профиля кольца по сравнению с профилем валков. Получение окончательного профиля с заданной точностью требует проведения дополнительных исследований. Стратегия кольцераскатки в этом случае заключается в том, что следует правильно рассчитать затраты на получение профильного кольца и получаемую выгоду от экономии материала, сравнить эти затраты с изготовлением кольца прямоугольного сечения с учетом последующей механической обработки.

### Особенности автоматизированных кольцераскатных производств

Автоматические линии являются средством автоматизации процессов в машиностроении, характеризующихся массовым выпуском однотипной продукции. Они представляют собой цепочку автоматического оборудования, установленного согласно технологическому процессу соединенных между собой транспортирующими устройствами. При этом все технологические операции выполняются непрерывно, без участия человека.

Использование систем ЧПУ (рис. 2) для управления процессом изготовления колец принципиально изменило технологический процесс изготовления колец.



Рис. 2. Пульта управления системой ЧПУ кольцераскатной установки

Кольцераскатной комплекс с системой ЧПУ позволяет контролировать и управлять изготовлением каждого кольца. Это позволяет получать качественное по физико-механическим свойствам кольцо с минимальными допусками под последующую обработку. Контроль за температурой кольца позволяет выполнить технологический цикл изготовления кольца с одного нагрева, что значительно снижает затраты энергии на производство.

По условиям совместной работы оборудования в составе автоматизированной линии следует различать автоматизированные линии с жесткой связью (синхронные – заготовки с выхода предыдущей рабочей позиции непосредственно поступают на входы последующей рабочей позиции) и автоматизированными линиями с гибкой связью (несинхронные – заготовки с выхода предыдущей рабочей позиции поступают на входы последующей рабочей позиции через промежуточные накопители). При создании автоматизированных линий с большой номенклатурой и большим диапазоном габаритов кольцевых заготовок целесообразно использовать автоматизированные линии с гибкой связью. В автоматизированных кольцераскатных линиях с гибкой связью включают следующие составные части.

**Участок складирования проката.** Должен обеспечить автоматизированное складирование заданной номенклатуры проката с последующей передачей проката на участок резки (рис. 3).

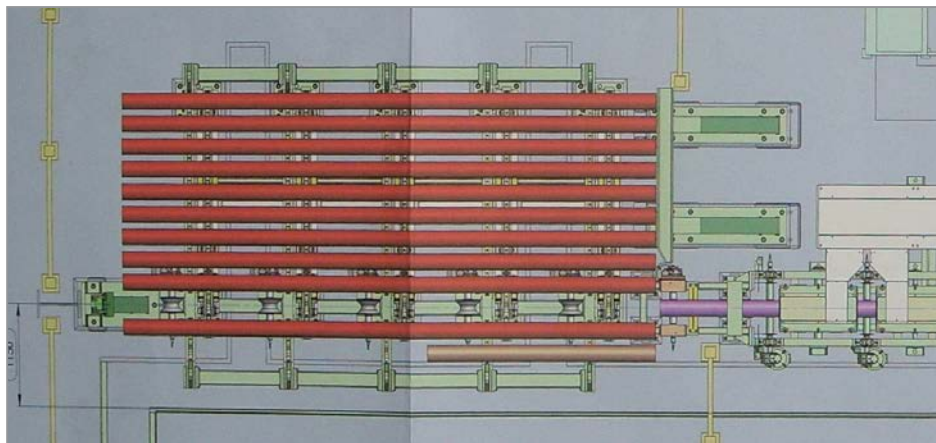


Рис. 3. Схема склада прутков длиной от 2000 до 6000 мм и диаметром до 180 мм с системой автоматизированного перемещения заготовок в составе автоматизированной линии поставки компании Murgaro S.p.A на Минском подшипниковом заводе

Объем участка складирования проката должен обеспечить минимальные остановки автоматизированной линии для загрузки проката. Рекомендуется создание объема участка складирования проката не менее 3-сменного режима работы автоматизированной линии.

**Участок резки проката с накопителем отрезанных заготовок.** Должен обеспечить выдачу отрезанных заготовок для автоматизированной линии в соответствии с заданным тактовым временем. В зависимости от максимального диаметра проката, используемого для работы в автоматизированной линии, выбираются способ и оборудование для резки.

Участок резки должен быть полностью автоматизирован и в его состав включают устройство для измерения диаметра проката и расчета длины отрезаемой заготовки по заданной массе заготовки, или электронную систему взвешивания штанги, связанную с регулировкой длины отрезаемой заготовки; устройство для механизированной замены дисковой пилы; устройство удаления стружки; устройство маркировки отрезанных заготовок; накопитель отрезанных заготовок; устройства подачи отрезанной заготовки на накопитель и с накопителя; устройство подачи отрезанной заготовки на устройство нагрева; подсистему управления участком резки.

На рис. 4 показаны станки для резки дисковыми пилами на участке резки в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия). Если подача отрезанных заготовок с участка резки происходит в соответствии с заданным тактовым временем, накопитель отрезанных заготовок не используют. Если подача отрезанных заготовок с участка резки в соответствии с заданным тактовым временем не обеспечивается, то подачу заготовок проводят из накопителя (рис. 5).



Рис. 4. Участок резки дисковыми пилами на автоматизированной линии для изготовления железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)



Рис. 5. Накопитель заготовок в составе автоматизированной линии для изготовления железнодорожных колес на Выксунском металлургическом заводе (Россия)

**Участок нагрева с устройством удаления окалины.** Должен обеспечить выдачу нагретых заготовок для автоматизированной линии в соответствии с заданным тактовым временем. При выборе способа и температуры нагрева заготовки под кольцераскатку следует знать температурный интервал материала кольца между максимальной температурой нагрева заготовки в печи и температурой окончания кольцераскатки. Температура нагрева заготовки всегда выше температуры заготовки перед прессом. Температура заготовки после прессы перед кольцераскаткой будет значительно отличаться от температуры нагрева заготовки в печи и иметь перепад температур на поверхности и внутри заготовки кольца. Поэтому температура нагрева заготовок должна устанавливаться в зависимости от массы и свойств материала заготовки, степени деформирования на разных операциях, а также тактового времени нахождения нагретой заготовки кольца на разных стадиях изготовления.

Для проката диаметром до 300 мм возможно использование индукционного нагрева. Это обеспечивает автоматизацию нагрева и требуемое тактовое время работы автоматизированной линии. Для нагрева проката диаметрами более 300 мм используют камерные печи или печи с вращающимся подом (рис. 6). Для нагрева проката диаметром более 500 мм и при небольших партиях изготовления кольцевых заготовок целесообразно использование газовых камерных печей как для основного нагрева, так и для дополнительного нагрева после прессы при необходимости.

В качестве устройств для удаления окалины в автоматизированных линиях эффективно используются установки гидросбива окалины водой (рис. 7).

**Пресс с механизацией замены инструмента.** Обеспечивает выдачу заготовок с заданными по технологическому процессу формой, температурой и машинным временем. Тактовое время автоматизированной линии обычно определяется техническими возможностями прессы. Для сокращения времени простоя линии для замены инструмента на прессе используют автоматизированную систему замены комплекта штампов (рис. 8).



Рис. 6. Печь с вращающимся подом в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)



Рис. 7. Установка гидросбива окалины водой в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)



Рис. 8. Гидравлический пресс с автоматизированной заменой штампов в составе автоматизированной линии поставки компании Murgato S.p.A на Минском подшипниковом заводе

**Кольцеракатный стан с механизацией замены инструмента.** Должен обеспечить выдачу заготовок с заданными технологическим процессом параметрами – формой и температурой в рамках машинного времени. Тактовое время для автоматизированной линии в ряде случаев определяется техническими возможностями кольцеракатного стана [15].

**Система охлаждения.** Должна обеспечить охлаждение заготовок после кольцеракатки до 60 °С с минимальным короблением заготовок. Одним из вариантов может быть туннель с вентиляционной системой и конвейером с регулируемой скоростью перемещения. Время нахождения заготовок в системе охлаждения достигает 3 ч.

**Экспандеры.** Предназначены для исправления погрешности колец после кольцеракатки в горячем, полугорячем и холодном состоянии. Для использования экспандера в составе автоматизированной линии требуется разработка специальной его конструкции [16] и определения места использования.

**Измерительная станция.** Должна в тактовом времени обеспечить полный контроль размеров холодного кольца, зафиксировать результаты измерения в системе управления линией, дать команду на транспортировку кольца на склад или в брак. Должна быть обратная связь со всеми видами оборудования для внесения корректировок в технологический процесс изготовления кольца по результатам измерения «горячего» и «холодного» кольца.

**Склад готовых колец.** Должен в тактовом времени обеспечить прием годных колец и их складирование в определенном порядке с выдачей информации о месте хранения каждого кольца в систему управления автоматизированной линии. Склад готовых колец, как и участок складирования проката,

должен быть рассчитан на определенный объем хранения годных колец и должен освобождаться при остановке работы автоматизированной линии. Следует рассчитывать объемы участка складирования проката и склада готовых колец на их загрузку и разгрузку на одно и то же время остановки работы автоматизированной линии.

**Устройства механизации замены и складирования инструмента.** Обязательная составная часть линии. Планирование замены инструмента следует совмещать с остановками линии для загрузки участка складирования проката и разгрузки склада готовых колец. В связи с этим устройства для механизации замены инструмента и места его складирования должны быть выполнены так, чтобы время на замену инструмента не превышало время загрузки участка складирования проката и разгрузки склада готовых колец.

**Транспортные средства между всеми видами оборудования линии.** Обязательны для автоматизированной линии. Дополнительное требование к ним – минимальное время на транспортирование от нагрева до гидросбива окалины, от гидросбива окалины до пресса и от пресса на кольцераскатку. Кроме того, все транспортные средства должны передавать информацию о перемещениях заготовок в систему управления линией.

**Система безопасности.** Наружные защитные приспособления для предотвращения нанесения вреда персоналу от автоматически работающих компонентов линии. Представляет собой (рис. 9) защитное ограждение с электрической блокировкой и контролем дверей.

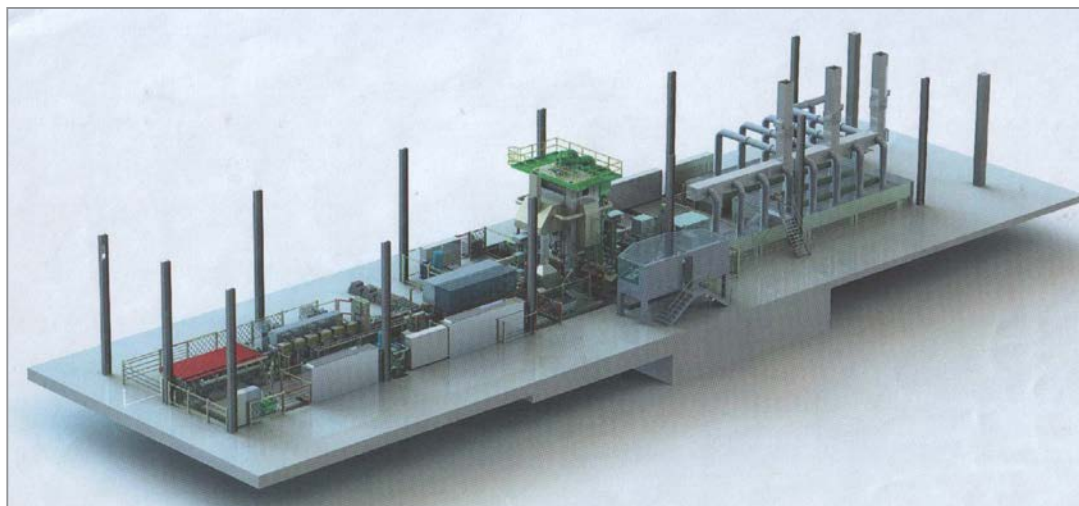


Рис. 9. Схема ограждения автоматизированной линии на Минском подшипниковом заводе

Доступ к внутренней зоне автоматизированной линии разрешен только тогда, когда оборудование автоматизированной линии отключено или переведено в безопасный режим. В случае включения команды «аварийный останов» все опасные движения оборудования линии должны быть остановлены и заблокированы от автоматического повторного пуска.

**Система управления автоматизированной линией.** Выполняет следующие функции: управление каждым видом оборудования в ручном и автоматизированном режимах; сбор и обработка информации о прохождении и технологических режимах обработки заготовок на всех операциях изготовления; обработка и статистическая обработка производственных данных; возможность корректировки режимов обработки заготовок в ручном режиме управления; автоматизированный учет неисправностей и времени простоя оборудования с классификацией причин простоя; хранение измерений и параметров технологического процесса не менее 6 мес; дистанционный сервис.

**Центральная кабина управления** (рис. 10). Включает центральный пульт управления, с которого обеспечивается управление участком складирования заготовок, участками резки и нагрева, прессом, кольцераскатной установкой, системой охлаждения, участком складирования холодных заготовок, а также всеми средствами автоматизации.

С центрального пульта управления осуществляется контроль изготовления кольцевых заготовок по всему технологическому циклу с вводом данных и выводом регистрируемых параметров на центральный сервер банка данных, в котором записываются данные, регистрируемые в технологическом цикле изготовления с использованием соответствующих централизованных рабочих программ.



Рис. 10. Кабина управления автоматизированной линией на Минском подшипниковом заводе

### **Особенности технологии изготовления кольцевых заготовок на автоматизированной линии с гибкой связью**

Проведенный анализ состава автоматизированной линии с гибкой связью для изготовления кольцевых заготовок показал, что линия является дорогим техническим решением и после приобретения необходимо организовать ее работу с максимальной загрузкой и максимальной эффективностью. В задачи поставщика решение этих вопросов не входит.

Примером поставки кольцераскатного комплекса без технологического программного обеспечения может быть поставка кольцераскатного комплекса компании Murgato на Минский подшипниковый завод. Компания Murgato располагала программным обеспечением FORGE и выполнила необходимые расчеты и моделирование для выбора параметров прессы и кольцераскатной установки для поставки Минскому подшипниковому заводу. Однако ни программного обеспечения FORGE, ни специализированного технологического программного обеспечения для проектирования технологических процессов изготовления колец вместе с поставленным кольцераскатном комплексе Минский подшипниковый завод не получил. При освоении производства новых колец отработку технологических параметров проводят экспериментально. Это требует значительных затрат времени и средств.

На ОАО «Завод ПАК» планируется изготовление более 100 наименований кольцевых заготовок с наружным диаметром до 3000 мм и массой до 3000 кг на автоматизированной линии, которая по планируемым показателям будет самой современной и единственной по уровню автоматизации и параметрам кольцевых заготовок в Европе.

Поставленная автоматизированная линия имеет точно заданные параметры. Поэтому возможности выбора технологических параметров производства кольцевых заготовок в условиях линии не могут назначаться по справочным рекомендациям, а должны быть адаптированы к эксплуатационным параметрам оборудования автоматизированной линии.

### **Анализ задач технологического обеспечения работы автоматизированного кольцераскатного комплекса позволил сделать следующие выводы**

Разработка технологии изготовления кольцевых заготовок требует решения ряда специфических проблем, связанных с работой автоматизированной линии, на которой выполняются операции складирования, резки, нагрева, прессования, кольцераскатки, экспандирования, контроля в едином тактовом времени. Поэтому для работы линии придется разработать собственную методику проектирования технологии изготовления кольцевых заготовок, адаптированную к технологическим возможностям линии, разработать систему краткосрочного и долгосрочного планирования загрузки линии.

После приобретения автоматизированной линии необходимо организовать ее работу с максимальной загрузкой и эффективностью. В задачи поставщика решение этих вопросов не входит. Использование опыта создания автоматизированных производств железнодорожных колес при создании автоматизированной линии производства кольцевых заготовок на ОАО «БЕЛАЗ» невозможно, так как требуется обеспечить производство на этой линии колец разной конструктивной формы (гильзы, фланцы, диски), что требует использования разного соотношения радиальных и осевых усилий кольцераскатки; колец с прямоугольным и профильным поперечным сечением, что требует использования разного технологического оснащения; колец из разных марок сталей с разным температурным диапазоном пластического



деформирования; колец с разной жесткостью и разной склонностью к деформациям в процессе обработки, транспортирования и охлаждения; колец с разными годовыми программами выпуска в диапазоне от 100 до нескольких тысяч, что требует особой разработки средств механизации для переналадок.

Анализ информации по методам получения кольцевых заготовок показал, что для обеспечения максимальной загрузки и эффективности работы создаваемого в Беларуси автоматизированного кольцеракатного комплекса необходима не только закупка современного оборудования, но и разработка научных основ технологии кольцеракатки применительно к создаваемому комплексу. Это требует решения следующих задач.

Для максимальной загрузки автоматизированной линии требуется проектировать технологические операции автоматизированной линии с близкими значениями машинного времени для достижения минимального тактового времени; проектировать унифицированные формы заготовки кольца для сокращения номенклатуры инструмента; разработать (ежедневную, недельную и месячную) систему планирования производства с назначением расчетного времени на загрузку участка складирования проката, разгрузку склада готовых колец, замену инструмента.

Для оптимизации затрат и повышения эффективности линии требуется оптимизировать соотношение затрат по достижению точности с затратами по изменению параметров кольцевой заготовки; оптимизировать соотношение затрат на использование дополнительных операций (повторный нагрев, экспандирование) с затратами по изменению параметров заготовки.

Заранее отработать все технологические варианты производства колец разных типоразмеров на автоматизированной линии невозможно. В связи с этим необходимо предусмотреть использование технологического программного обеспечения как для создания технологических процессов изготовления каждого кольца, так и для использования этого программного обеспечения для корректировки технологических процессов непосредственно на автоматизированной линии с участием операторов.

Предусмотреть все варианты возможных отклонений, которые могут возникать при автоматизированном производстве кольцевых заготовок, также невозможно, поэтому надо обеспечить обучение и подготовку квалифицированных операторов для работы на автоматизированной линии и дистанционный сервис с фирмой-поставщиком линии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Marczinski, H.** Der Entwicklungsstand neuzeitlicher Ringwalzwerke / H. Marczinski // Stahl und Eisen 94. 1974. No 24. S. 1207–1211.
2. **Werner, W.** Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften / W. Werner, S. Volkmar // Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt. 2000. 5 s.
3. **Kluge, A.** Glühende Ringe – Das Ringwalzen als wichtiges Verfahren der Massivumformung / A. Kluge, H. Faber // MM Industrie Magazin, Vogel Industrie Medien GmbH & K Sonderdruck aus Heft. 2005. S. 26–31.
4. **Антонюк, В. Е.** Кольцеракатка в производстве деталей машиностроения / В. Е. Антонюк [и др.]. Мн.: Беларуская навука, 2013. 188 с.
5. **Антонюк, В. Е.** Задачи технологического обеспечения автоматизированного кольцеракатного комплекса / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский, В. В. Рудый // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 2 (55). С. 43–54.
6. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. М.: Машиностроение, 1977. 424 с.
7. **Целиков, А. И.** Теория прокатки: справ. / А. И. Целиков [и др.]. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
8. **Полухин, П. И.** Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справ. / П. И. Полухин, Г. Я. Гунн, А. М. Галкин. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
9. Ковка и штамповка: справ. Т. 2. Горячая штамповка / Под ред. Е. И. Семенова. М.: Машиностроение, 1986. 692 с.
10. **Groche, P.** Inkrementelle Massivumformung / P. Groche, D. Fritsche // Werkstattstechnik. 2005. No 10. P. 798–802.
11. **Doege, E.** Handbuch Umformtechnik / E. Doege, B.-A. Behrens. Springer Verlag, 2007. 913 p.
12. **Puller S.** Simulation des Werkstoffflusses beim Ringwalzen mittels elementarer Plastitätstheorie / Hannover: Universität, Diss., – 2003. – 110 s. // [Electronic ressource]. – Mode of access: //https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/6293. Date of access: 03.03.2021.
13. **Meier, H.** Mechanisches Deformationsmodell für das Ringwalzen. Zur Berechnung der maximal zulässigen Zentrierarmkräfte beim Radial-Axial-Ringwalzen / H. Meier, A. Pentleit // Werkstattstechnik wt-online – Ausgabe 06–2003. S. 485.
14. **Marchenko, M.** Radial-Axial-Ringwalzen. Dynamische 3D-Visualisierung eines Radial-Axial-Ringwalzprozesses / M. Marchenko: VDM Verlag Dr. Müller, 2010. 84 s.
15. Кольцеобразующие станы. Отличное качество для требовательных заказчиков. SMS Meer, 2004. 24 с.
16. **Антонюк, В. Е.** Динамическая стабилизация мало жестких колец после кольцеракатки / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. № 3 (52). С. 28–35.