

УДК 621.81

В.Е. АНТОНЮК, д-р техн. наук

главный научный сотрудник лаборатории металлургии в машиностроении<sup>1</sup>

E-mail: vladi@tut.by

С.Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук, доц.

заведующий лабораторией металлургии в машиностроении<sup>1</sup>

E-mail: sand\_work@mail.ru

В.В. РУДЫЙ, канд. техн. наук

главный технолог<sup>2</sup>

E-mail: rvw@belaz.minsk.by

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 01.03.2021.

## ЗАДАЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОЛЬЦЕРАСКАТНОГО КОМПЛЕКСА

*Описаны физические основы и преимущества кольцераскатки. Обобщены материаловедческие и технологические процессы производства изделий с ее использованием. Проведен анализ оборудования автоматизированной кольцераскатной линии, показавший, что она является сложным и дорогим техническим решением. Причем организация работы линии с максимальной загрузкой и эффективностью в задачи поставщика не входит. Определены требования для максимальной загрузки линии и ее эффективной работы. Показано, что использование опыта создания автоматизированных производств железнодорожных колес при создании автоматизированного производства кольцевых заготовок невозможно из-за необходимости обеспечить производство колец разной конструктивной формы из разных марок сталей с разным температурным диапазоном пластического деформирования и с разными (от ста до нескольких тысяч) годовыми программами выпуска. Это требует использования разного соотношения радиальных и осевых усилий кольцераскатки, разного технологического оснащения, учета разной жесткости колец и их склонности к деформациям в процессе обработки, транспортировки и охлаждения, особой разработки средств механизации для переналадок. Заранее отработать все технологические варианты производства колец разных типоразмеров на автоматизированной линии невозможно. В связи с этим, для эффективной работы комплекса необходимо создать технологическое и программное обеспечение процессов изготовления каждого кольца, предусмотреть возможность корректировки технологических процессов непосредственно на автоматизированной линии с участием операторов. На этой основе осуществлена постановка задач технологического обеспечения работы автоматизированного кольцераскатного комплекса на ОАО «БЕЛАЗ».*

**Ключевые слова:** кольцевая заготовка, нагрев, прессование, раскатка, моделирование, пластическое деформирование

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-42-53>

**Введение.** Кольцераскатка позволяет создать ответственные детали машиностроения с высокими точностью и механическими свойствами [1–4]. Ассортимент изготавливаемых с ее использованием деталей расширяется и по размерам, и по материалам. В мире уже освоен процесс кольцераскатки деталей с наружным диаметром до 15 м, высотой до 3,5 м и массой до 30 т. В Европе работает более 30 кольцераскатных производств. Но из них только две линии, специализированные для узкого диапазона заготовок подшипников, являются автоматизированными: линия компании

Ovako (Швеция) с диаметром колец  $D$  до 1200 мм и линия на Минском подшипниковом заводе (ОАО «МПЗ») с  $D$  до 600 мм [5].

В 2021 году планируется закупка технологии и оборудования автоматизированной линии для изготовления кольцевых заготовок для ОАО «БЕЛАЗ». Ее особенность — управление технологическим процессом без вмешательства операторов. Им отводится роль наблюдения и вмешательства в процесс только при необходимости.

Условием создания автоматизированной линии является выбор оптимальных параметров по соот-

ношению цены и технических возможностей на основе конкурса между поставщиками. При закупке всегда выполняется условие обеспечения заданных технических параметров линии. Приемку кольцераскатных комплексов заказчик проводит на тестовых деталях, для которых разработку технологии выполняет поставщик. Основным условием приемки является достижение заданных производительности и точности тестовых кольцевых заготовок. На этом обязательства поставщика автоматизированной линии для производства кольцевых заготовок считаются выполненными. Дальнейшее освоение производства кольцевых заготовок возлагается на заказчика.

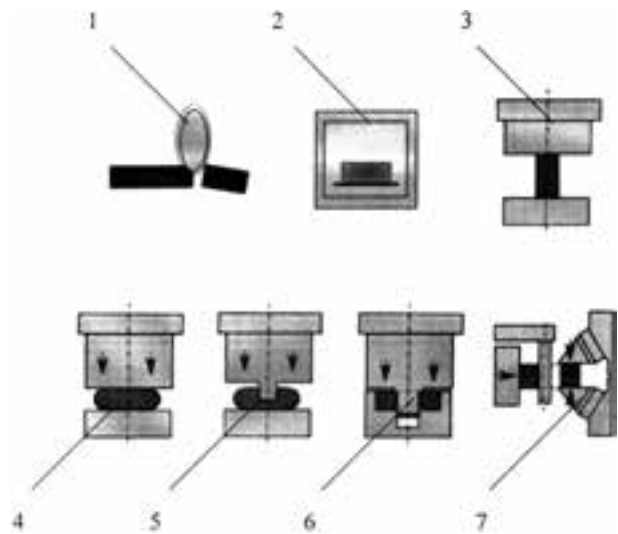
Автоматизированная линия является дорогим техническим решением и после приобретения необходимо организовать ее работу с максимальной эффективностью и загрузкой. В задачи поставщика решение этих вопросов не входит. Общение с поставщиками кольцераскатного оборудования показало, что их опыт эксплуатации оборудования является ноу-хау этих фирм. 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 статьи* — 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 ОАО «БЕЛАЗ».

**Физические и материаловедческие основы кольцераскатки.** В основе кольцераскатки лежит пластическое деформирование материалов и при разработке технологий кольцераскатки используют его основные положения [6–11]. Кроме возможности изготовления деталей сложной формы, пластическое деформирование позволяет создавать ответственные детали машиностроения с высокими точностью и механическими свойствами.

Технология изготовления раскатанных бесшовных колец включает операции резки заготовок, нагрева, осадки, наметки отверстия, прошивки отверстия, кольцераскатки (рисунок 1).

Процесс пластического деформирования начинается с теплового преобразования свойств материала [12], для чего используются разные виды нагрева и соответственно оборудования. Пластическое деформирование нагретого материала осуществляют на разных типах кузнечно-прессового оборудования. При осуществлении кольцераскатки деформирование и течение материала аналогично процессу прокатки. Обязательным является соблю-



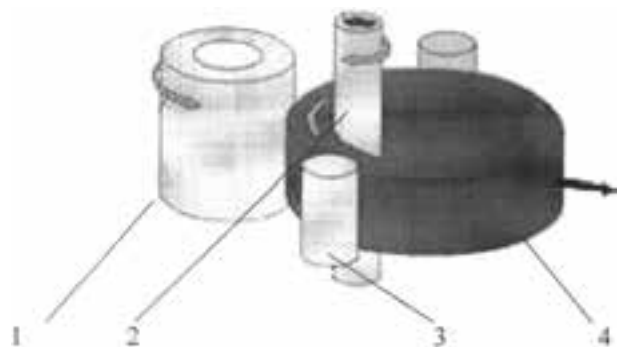
**Рисунок 1 — Технологический процесс изготовления раскатных колец:** 1 — резка заготовок; 2 — нагрев; 3 — подача на пресс; 4 — осадка; 5 — наметка отверстия; 6 — прошивка отверстия; 7 — кольцераскатка

**Figure 1 — Technological process of production of rolling rings:** 1 — cutting of blanks; 2 — heating; 3 — feeding to the press; 4 — upsetting; 5 — hole marking; 6 — piercing; 7 — ring rolling

дение условий течения материала без образования трещин и внутренних напряжений. При правильном выборе схемы течения материала и соотношения усилий деформирования и пластичности можно достичь существенного улучшения структуры материала и механических свойств изготавливаемой детали. Наиболее перспективными процессами пластического деформирования являются процессы с многократным нагружением, к которым относятся радиальная и радиально-осевая кольцераскатки.

**Схемы кольцераскатки.** Процесс кольцераскатки заключается в деформировании кольца гладкими или профилированными валками с последовательным изменением наружного и внутреннего диаметров и высоты кольца. Деформирование кольца валками только в радиальном направлении называется радиальной кольцераскаткой (рисунок 2).

Деформирование кольца валками одновременно в радиальном и осевом направлениях называется радиально-осевой кольцераскаткой (рисунок 3) [13, 14].



**Рисунок 2 — Радиальная кольцераскатка:** 1 — главный валок; 2 — дорновой валок; 3 — центрирующий валок; 4 — кольцо

**Figure 2 — Radial ring rolling:** 1 — main roll; 2 — mandrel roll; 3 — centering roll; 4 — ring

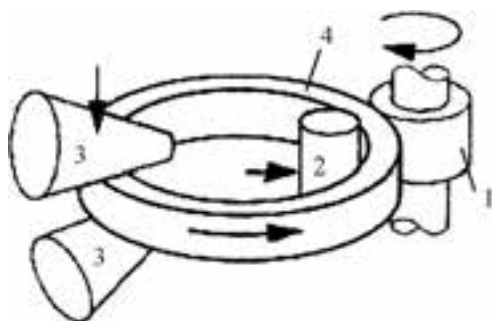


Рисунок 3 — Радиально-осевая кольцераскатка: 1 — осевые валки; 2 — кольцо; 3 — дорновой валок; 4 — главный валок  
 Figure 3 — Radial-axial ring rolling: 1 — axial rolls; 2 — ring; 3 — mandrel roll; 4 — main roll

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 подач.

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, в зависимости от программы изготавливаемых колец, затраты на получение профильного кольца и получаемую выгоду от экономии материала, а также сопоставить эти затраты с изготовлением кольца прямоугольного сечения с учетом последующей механической обработки.

Обязательным элементом современной кольцераскатной установки является система числового программного управления (ЧПУ), пульт управления которой обычно имеет вид, представленный на рисунке 4.

Использование систем ЧПУ для управления процессом изготовления колец принципиально изменило технологический процесс изготовления колец. Кольцераскатный комплекс с системой ЧПУ позволяет контролировать и управлять процессом изготовления каждого отдельного кольца. Это позволяет получать качественное по физико-механическим свойствам кольцо с минимальными припусками под последующую обработку. Контроль за температурой кольца позволяет выполнить технологический цикл изготовления кольца с одного нагрева, что значительно снижает затраты энергии на производство.

**Особенности автоматизированных кольцераскатных производств.** Автоматические линии



Рисунок 4 — Пульт управления системой ЧПУ кольцераскатной установки  
 Figure 4 — Control panel for the CNC system of the ring-rolling unit

являются средством автоматизации производственных процессов в машиностроении, характеризующихся массовым выпуском однотипной продукции. Они представляют собой цепочку автоматического оборудования, установленного согласно технологическому процессу, соединенного между собой транспортирующими устройствами, при этом все технологические операции выполняются непрерывно, без участия человека. По результатам анализа использования кольцераскатных комплексов за рубежом можно сделать вывод о том, что полностью автоматизированных производств для изготовления колец пока не существует, но можно отметить несколько автоматизированных линий с высокой степенью автоматизации:

- автоматизированная линия поставки компании Muraro S.p.A. для изготовления опорных валков и гусеничных натяжителей бульдозеров на заводе Berko (Италия);
- автоматизированная линия поставки компании Muraro S.p.A. для изготовления колец диаметром до 600 мм на ОАО «МПЗ» (Беларусь);
- автоматизированная линия поставки компании SMS Meer для изготовления колец диаметром до 1200 мм на предприятии Ovaako (Швеция).

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 в процессе перемещения и охлаждения. По конфигурации кольцевые заготовки могут иметь форму дисков, колец и гильз, по сечению профиля предполагается использовать преимущественно прямоугольный профиль, но закладываются требования и для изготовления колец со сложным профилем на наружном и внутреннем диаметрах.

По условиям совместной работы оборудования в составе автоматизированной линии следует различать автоматизированные линии с жесткой

связью (синхронные) и автоматизированными линиями с гибкой связью (несинхронные).

Автоматизированные линии, у которых заготовки с выхода предыдущей рабочей позиции непосредственно поступают на входы последующей рабочей позиции, являются автоматизированными линиями с жесткой связью (синхронные). К этому типу автоматизированных линий можно отнести автоматизированную линию поставки компании Muraro S.p.A. для изготовления колец диаметром до 600 мм на ОАО «МПЗ» и автоматизированную линию поставки компании SMS Meer для изготовления колец диаметром до 1200 мм на предприятии Ovako.

Автоматизированные линии, у которых заготовки с выхода предыдущей рабочей позиции поступают на входы последующей рабочей позиции через промежуточные накопители, являются автоматизированными линиями с гибкой связью (несинхронные). При создании автоматизированных линий с большой номенклатурой и с большим диапазоном габаритов кольцевых заготовок целесообразно использовать автоматизированные линии с гибкой связью.

**Состав автоматизированной линии с гибкой связью для изготовления кольцевых заготовок.** В автоматизированные кольцераскатные линии с гибкой связью включают следующие составные части.

*Участок складирования проката* должен обеспечить автоматизированное складирование заданной номенклатуры проката с последующей передачей проката на участок резки (рисунок 5).

В зависимости от планируемого производства кольцевых заготовок, на заданный период работы автоматизированной линии на участок складирования проката со склада проката (не входящего в автоматизированную линию) загружается в определенном порядке требуемое количество проката, информа-

ция об объемах и номенклатуре которого вводится в подсистему управления участком складирования проката и систему управления линией. После начала работы автоматизированной линии подсистема управления участком складирования проката в ручном или автоматизированном режиме управления дает команду на транспортирование требуемого проката на приемное устройство станка для резки. Объем участка складирования проката должен обеспечить минимальные остановки автоматизированной линии для загрузки. Рекомендуется создание объема участка складирования проката не менее трехсменного 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, выбирается способ и оборудование для резки.

При диаметрах проката не более 240 мм возможно использование процесса рубки на прессе с предварительным индуктивным нагревом до 700 °С. В этом случае обеспечивается процесс автоматизации рубки с использованием одного пресса и участок резки обеспечивает подачу отрезанных заготовок в соответствии с заданным тактовым временем. Например, для горячей резки прутков диаметром 180 мм требуется усилие пресс-ножниц 350 т. При этом пресс-ножницы оснащают оптическим контролем температуры и системой автоматического удаления отрезанных и начальных частей.

В случае использования проката с диаметрами свыше 250 мм используют механическую резку дисковыми или ленточными пилами. В этом случае участок резки проката должен обеспечить

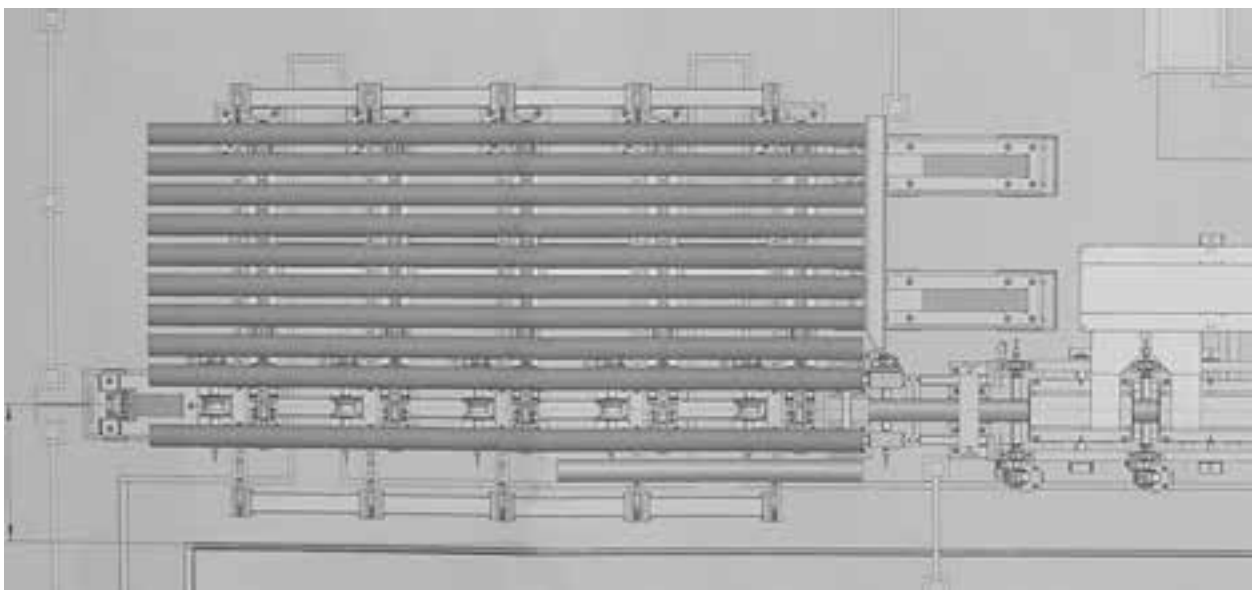


Рисунок 5 — Схема склада прутков длиной от 2000 мм до 6000 мм и диаметром до 180 мм с системой автоматизированного перемещения заготовок в составе автоматизированной линии поставки компании Muraro S.p.A. на ОАО «МПЗ»  
 Figure 5 — Diagram of the warehouse of bars with a length from 2,000 mm to 6,000 mm and a diameter of up to 180 mm with the system of automated movement of workpieces as part of the automated delivery line of Muraro S.p.A. at JSC “MPZ”

автоматизированную резку проката с машинным временем, не большим тактового времени работы автоматизированной линии. Учитывая, что машинное время резки проката одним станком может превышать тактовое время работы автоматизированной линии, на участке резки используется несколько станков с автоматизированной загрузкой со склада заготовок. Анализ резки на зарубежных автоматизированных линиях показал преимущественное использование дисковых пил, на которых возможна резка проката с диаметрами до 600 мм.

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 электронная система взвешивания штанги, связанная 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;
- устройства подачи отрезанной заготовки на устройство нагрева;
- подсистема управления участком резки.

На рисунке 6 показаны станки для резки дисковыми пилами на участке резки в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия). В автоматизированных производствах железнодорожных колес и кольцевых заготовок для резки обычно используют дисковые пилы. Между участком резки и нагревом, как правило, имеется склад отрезанных маркированных заготовок.

Если подача отрезанных заготовок с участка резки происходит в соответствии с заданным тактовым временем, то накопитель отрезанных заготовок не используется. Если подача отрезанных заготовок с участка резки не обеспечивается в соответствии с заданным тактовым временем (один



Рисунок 6 — Участок резки дисковыми пилами на автоматизированной линии для изготовления железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)  
Figure 6 — Cutting area with circular saws on the automated line for the railway wheels manufacture at the Lucchini company (Italy)

из станков для резки не работает, машинное время резки превышает тактовое время), то подача заготовок происходит из накопителя заготовок.

На рисунке 7 показан автоматизированный накопитель заготовок в составе автоматизированной линии для изготовления железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия).

*Участок нагрева с устройством удаления окалины.* Участок резки проката должен обеспечить выдачу нагретых заготовок в соответствии с заданным тактовым временем для автоматизированной линии. В зависимости от максимального диаметра проката, используемого для работы в автоматизированной линии, выбирается способ и оборудование для нагрева. Для проката диаметром до 300 мм возможно использование индукционного нагрева. Это обеспечивает автоматизацию нагрева и требуемое тактовое время работы автоматизированной линии. Для нагрева проката диаметром более 300 мм используют камерные печи или печи с вращающимся подом. Анализ нагрева на зарубежных автоматизированных линиях показал преимущественное использование нагрева в газовых печах с вращающимся подом. На рисунке 8 изображена печь с вращающимся подом в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия).

Для нагрева проката диаметром более 500 мм и при небольших партиях изготовления кольцевых заготовок в автоматизированных производствах целесообразно использование газовых камерных печей как для основного нагрева, так и для дополнительного нагрева после прессы при необходимости. Печи должны быть оснащены системой измерения и регулировки температуры печи, включая систему регулировки горелок, а также иметь электрическую систему управления. Должна быть предусмотрена система контроля размещения деталей в печи, система контроля процесса нагрева деталей.



Рисунок 7 — Накопитель заготовок в составе автоматизированной линии для изготовления железнодорожных колес на Выксунском металлургическом заводе (Россия)  
Figure 7 — Storage of blanks as part of the automated line for the railway wheels manufacture at the Vyksa Steel Works (Russia)



Рисунок 8 — Печь с вращающимся подом в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)  
Figure 8 — Rotary hearth furnace as part of the automated line for the railway wheels manufacture at the Lucchini company (Italy)



Рисунок 9 — Установка гидросбива окалины водой в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)  
Figure 9 — Installation of a water scale hydraulic pump as part of the automated line for the railway wheels manufacture at the Lucchini company (Italy)

При выборе способа и температуры нагрева заготовки под кольцераскатку следует точно знать температурный интервал материала кольца между максимальной температурой нагрева заготовки в печи и температурой окончания кольцераскатки. Учитывая, что процесс изготовления кольцевой заготовки включает получение предварительной формы кольца на прессе с последующей раскаткой на кольцераскатной установке с одного нагрева заготовки, то процесс нагрева заготовок под кольцераскатку является ответственной операцией в автоматизированной линии. Температура нагрева заготовки всегда будет немного выше температуры заготовки перед прессом. Температура заготовки после пресса 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.

В качестве устройств для удаления окалины в автоматизированных линиях эффективно используются установки гидросбива окалины водой (рисунок 9).

*Дополнительный нагрев с устройством удаления окалины.* Основное требование к условиям нагрева заготовок для автоматизированной линии в том, что целесообразным и экономичным вариантом работы линии является использование одного нагрева. Для обеспечения работы автоматизированной линии с одним нагревом следует:

- обеспечить нагрев отрезанных заготовок с максимальной допустимой температурой нагрева для заданной марки стали;
- максимально сократить время транспортирования заготовок от нагрева до гидросбива окалины, от гидросбива окалины до пресса и от пресса на кольцераскатку; сокращать пути перемещения и использовать более быстродействующие поворотные манипуляторы вместо рельсовых;

- использовать при прессовании варианты получения заготовки под кольцераскатку на двух позициях вместо трех, сокращать пути холостых перемещений и время прессования;
- при возможности объединять заготовки малой массы в двух и более кратные заготовки с последующей разрезкой.

*Пресс с механизацией замены инструмента* должен обеспечить выдачу заготовок с заданными по технологическому процессу формой, температурой и машинным временем. Тактовое время для автоматизированной линии в большинстве случаев определяется техническими возможностями пресса. Для сокращения времени простоя автоматизированной линии для замены инструмента на прессе целесообразно использовать автоматизированную систему замены комплекта штампов (рисунок 10).

Основными характеристиками кольцевого пресса являются усилия прессования и прошивки, а также скорости перемещения верхней траверсы при максимальной нагрузке. Это является важнейшей характеристикой для использования пресса в составе автоматизированной линии. Обычно кольцевозаготовительный пресс для осадки и прошивки поставляется вместе с устройством для механизированной замены штамповой оснастки, устройством для удаления окалины, устройством для удаления выдры, устройством охлаждения и смазки инструмента. Иногда для сокращения подготовительного времени при переналадке поставляется мобильное устройство для нагрева штампов.

*Кольцераскатный 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 кольцераскатного стана [15].

Для сокращения времени простоя автоматизированной линии для замены инструмента на кольцераскатном стане, который используется в составе



a



b

Рисунок 10 — Гидравлический пресс с автоматизированной заменой штампов в составе автоматизированной линии поставки компании Muraro S.p.A. на ОАО «МПЗ»

Figure 10 — Hydraulic press with automated die replacement as part of the automated delivery line of Muraro S.p.A. at JSC «MPZ»

автоматизированной линии, целесообразно использовать автоматизированную или механизированную систему замены кольцераскатных валков. В каждом конкретном случае варианты конструкции и поставки систем замены кольцераскатных валков для кольцераскатного стана в составе автоматизированной линии должны оцениваться в первую очередь по времени простоя линии. Этот показатель должен входить в перечень гарантированных показателей поставки. Большинство систем замены кольцераскатных валков не рассчитаны на использование в автоматизированной линии и требуют значительных затрат времени, что недопустимо.

Обычно кольцераскатный стан поставляется с устройствами контроля параметров кольцераскатки (текущие размеры кольца, температура и усилия), контроля температуры заготовки до и после кольцераскатки, системой смазки и охлаждения валков, устройством сдува окалины. В поставку кольцераскатного стана для автоматизированной линии должно быть включено лазерное устройство для измерения геометрических параметров горячей заготовки после кольцераскатки и устройство для маркировки колец. Результаты измерения должны входить в систему управления кольцераскатным станом.

Система охлаждения должна обеспечить охлаждение заготовок после кольцераскатки до температуры ориентировочно 60 °С с минимальным короблением заготовок. Одним из вариантов может быть туннель с вентиляционной системой и конвейером с регулируемой скоростью перемещения (рисунок 11). Время нахождения заготовок в системе охлаждения достигает 3 часов.

Экспандеры предназначены для исправления погрешности колец после кольцераскатки в горячем, полугорячем и холодном состоянии. Пока не сложилось четкого мнения о возможностях использования экспандеров в составе автоматизированной линии, так как требуемое машинное время для обработки кольца на экспандере превышает тактовое время линии. Информации об использовании экспандеров в кольцераскатных комплексах нет. Для использования экспандера в составе автоматизированной линии требуется разработка специальной его конструкции [16] и определение места использования.

Измерительная станция в составе автоматизированной линии должна в тактовом времени обеспечить полный контроль геометрических параметров 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 входит в состав автоматизированной линии и 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 линией. 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. В связи с этим 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 участка складирования проката и 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 автомати-

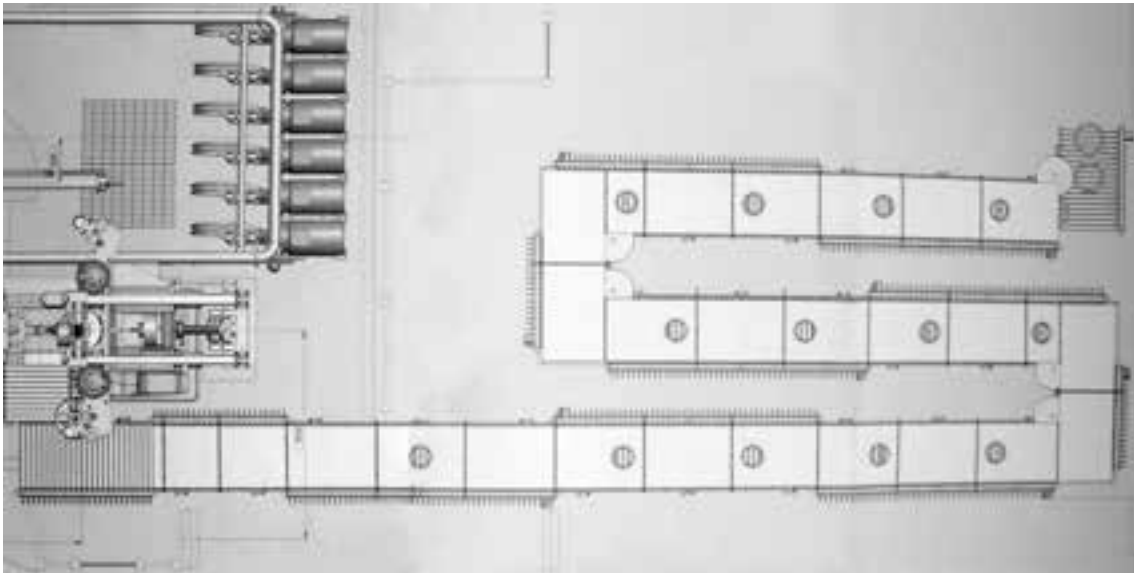


Рисунок 11 — Схема туннеля с вентиляционной системой и конвейером с регулируемой скоростью перемещения в составе автоматизированной линии поставки компании Muraro S.p.A. на ОАО «МПЗ»  
 Figure 11 — Diagram of a tunnel with a ventilation system and a conveyor with an adjustable speed of movement as part of the automated delivery line of Muraro S.p.A. at JSC “MPZ”

зированной 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 этого 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 защитное ограждение с электрической блокировкой и контролем дверей (рисунок 12).

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

*Система управления линией* включает подсистемы управления каждым участком или видом обо-

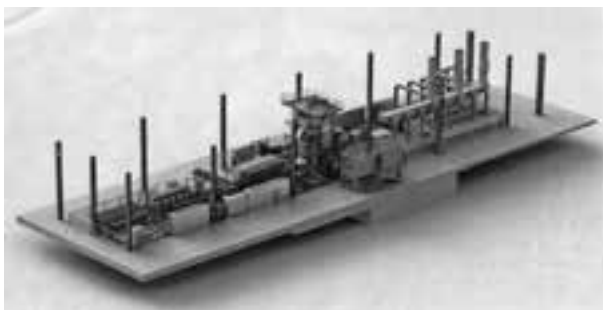


Рисунок 12 — Схема ограждения автоматизированной линии на ОАО «МПЗ»  
 Figure 12 — Scheme of fencing of the automated line at JSC “MPZ”

рудования линии и систему безопасности. В подсистеме управления нагревательной печью, прессом, кольцераскатным станом, экспандером вводятся возможности использования технологических систем проектирования операций нагрева, прессования, кольцераскатки, экспандирования с возможностями корректировки параметров этих операций в процессе производства. Должна быть обратная связь средств измерения на промежуточных технологических операциях и измерительной станции со всеми видами оборудования для внесения корректировок в технологический процесс изготовления кольца по результатам измерения «горячего» и «холодного» кольца.

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 месяцев;
- дистанционный сервис.

*Центральная кабина управления* (рисунок 13) 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.





Рисунок 13 — Кабина управления автоматизированной линией на ОАО «МПЗ»  
Figure 13 — Automated line control cabin at JSC “MPZ”

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.

Для каждого вида оборудования автоматизированной линии на центральном пульте управления размещаются мониторы для наблюдения за производственным процессом в автоматизированном режиме управления и для внесения необходимых корректировок в ручном режиме управления. В кабине управления должны находиться операторы для мониторинга всех операций автоматизированной линии, а также подменный оператор. Кабина должна быть расположена так, чтобы операторы управления прессом и кольцераскатным станом могли визуально наблюдать за процессом прессования и кольцераскатки. Также должны быть предусмотрены системы дистанционного контроля за остальными операциями.

**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 ее приобретения необходимо организовать работу с максимальной загрузкой и эффективностью. В задачи поставщика решение этих вопросов не входит. 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 назна-

чением 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.

Рассмотрим особенности и требования к технологии изготовления кольцевых заготовок в условиях автоматизированного производства на примере трех изготовителей кольцевых заготовок для подшипников — Минский подшипниковый завод, La Leonessa и Ovaکو. Все три предприятия изготавливают подшипники и имеют кольцераскатные комплексы для производства кольцевых заготовок. На ОАО «МПЗ» и Ovaکو производство кольцевых заготовок осуществляется на автоматизированных линиях, на La Leonessa автоматизирована работа прессы и кольцераскатного стана. На ОАО «МПЗ» и на Ovaکو максимальная масса заготовок составляет 250 кг, на La Leonessa — 350 кг. Учитывая, что на всех трех предприятиях для изготовления подшипников используют близкие по температурному диапазону и усилиям для деформирования марки сталей, можно прогнозировать, что технологические параметры прессования и кольцераскатки на этих предприятиях должны иметь близкие значения.

В таблице приведены технические показатели кольцераскатных комплексов на ОАО «МПЗ», La Leonessa и Ovaکو. Анализ показал существенные различия технологии изготовления кольцевых заготовок, близких по маркам сталей и весовым показателям:

- на ОАО «МПЗ» для изготовления колец с наружным диаметром до 600 мм и массой до 250 кг используют самый мощный пресс с усилием 30 МН; на La Leonessa используют пресс с усилием 20 МН для изготовления колец с наружным диаметром 2200 мм и массой до 350 кг;
- на ОАО «МПЗ» изготовление заготовки под кольцераскатку осуществляется на трех позициях на прессе с усилием 30 МН; в результате заготовка под кольцераскатку имеет пониженную температуру, и процесс кольцераскатки происходит при максимальном использовании силовых параметров кольцераскатного стана; при этом часть колец после кольцераскатки имеет трещины;
- на La Leonessa изготовление заготовки под кольцераскатку осуществляют на двух позициях на прессе с усилием 20 МН — осадка и полная прошивка отверстия, в результате заготовка после прессы имеет более высокую температуру, не требуется дополнительный нагрев и отсутствуют проблемы на операции кольцераскатки.

Таблица — Технические показатели кольцераскатных комплексов  
Table — Technical indicators of ring-rolling complexes

Параметры	ОАО «МПЗ» (Беларусь)	La Leonessa (Италия)	Ovaco (Швеция)
Назначение кольцевых заготовок	Заготовки подшипников	Заготовки подшипников	Заготовки подшипников
Наружный диаметр заготовки, мм	600	320–2200	200–1200
Высота заготовки, мм	20–250	30–160	350
Максимальная масса заготовки, кг	250	350	50–250
Уровень автоматизации	Автоматизированная линия, два манипулятора Muraro	Комплекс пресс-кольцераскатка один манипулятор KUKA	Автоматизированная линия RiWa 2000/80
Способ резки проката	Рубка на пресс-ножницах 350 т Прокат 140–180 мм	Ленточные пилы Прокат до 300 мм	Дисковые пилы
Способ нагрева отрезанных заготовок	Индукционный до 240 мм	Печь с вращающимся подом	Печь с вращающимся подом
ПРЕСС	Muraro S.p.A.	HYDROMEG	SMS Meer
- модель	Muraro S.p.A.	HSF 2000	KRP 2000-3
- количество позиций	3-позиционный	2-позиционный	3-позиционный
- усилие, кН	30 000	20 000	20 000
Повторный нагрев после пресса	не применяется	не применяется	не применяется
КОЛЬЦЕРАСКАТНЫЙ СТАН	Muraro S.p.A.	HYDROMEG	SMS RAW 80(100)/63 (80)-1200/350
- программное обеспечение	Muraro	HYDROMEG	CARWIN
- максимальное радиальное усилие	не указано	1250 кН	800 кН
- максимальное осевое усилие	не указано	1250 кН	630 кН
ЭКСПАНДЕР	не применяется	не применяется	не применяется

Этот пример показывает, что приобретение мощного пресса и кольцераскатного стана не гарантируют эффективную работу кольцераскатного комплекса.

Примером поставки кольцераскатного комплекса без технологического программного обеспечения может быть поставка кольцераскатного комплекса компании Muraro S.p.A. на ОАО «МПЗ». Данное предприятие располагало программным обеспечением FORGE и выполнила необходимые расчеты и моделирование для выбора параметров пресса 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 кольцераскатным комплексом ОАО «МПЗ» не получил. При освоении производства новых колец отработку технологических параметров проводят экспериментально. Это требует значительных затрат времени и средств.

На ОАО «Завод приборов автоматического контроля» 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.

При разработке технологии изготовления кольцевых заготовок требуется решение 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 на закупленной автоматизированной линии необходимо разработать собственную методику проектирования технологии изготовления кольцевых заготовок, адаптированную к технологическим возможностям поставленной автоматизированной линии; разработать систему краткосрочного и долгосрочного планирования загрузки линии.

**Заключение.** После приобретения автоматизированной линии необходимо организовать ее работу с максимальной нагрузкой 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 ста 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 кольцераскатного комплекса необходима не только закупка современного оборудования, но и разработка научных основ технологии кольцераскатки применительно к создаваемому комплексу. Это требует решения следующих задач.

Для максимальной загрузки автоматизированной линии требуется:

- проектировать разные технологические операции 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 изготов-

ления 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.

## Список литературы

1. Marczynski, H. Der Entwicklungsstand neuzeitlicher Ringwalzwerke / H. Marczynski // Stahl und Eisen. — 1974. — Vol. 94, no. 24. — Pp. 1207–1211.
2. Werner, W. Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften / W. Werner, S. Volkmar // Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt. — 2000. — 5 p.
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. — Pp. 26–31.
4. Кольцераскатка в производстве деталей машиностроения / Антонюк В.Е. [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 188 с.
5. Введен в эксплуатацию кольцераскатный комплекс Muraro // Одиннадцать. — 2017. — № 5(3229), 7 авг. — С. 1–3.
6. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. — М.: Машиностроение, 1977. — 424 с.
7. Теория прокатки: справ. / А.И. Целиков [и др.]; под науч. ред. В.И. Зюзина, А.В. Третьякова. — М.: Металлургия, 1982. — 335 с.
8. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гунн, А.М. Галкин. — 2-е изд. — М.: Металлургия, 1983. — 352 с.
9. Ковка и штамповка: справ. в 4 т. / под ред. Е.И. Семенова. — М.: Машиностроение, 1986. — Т. 2. Горячая штамповка. — 592 с.
10. Groche, P. Inkrementelle Massivumformung / P. Groche, D. Fritsche // Werkstattstechnik. — 2005. — No. 10. — Pp. 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 [Electronic resource]. — Hannover, 2003. — 110 p. — 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. — 2003. — Vol. 93, no. 5. — Pp. 485–488.
14. Marchenko, M. Radial-Axial-Ringwalzen. Dynamische 3D-Visualisierung eines Radial-Axial-Ringwalzprozesses / M. Marchenko. — VDM Verlag Dr. Müller, 2010. — 84 p.
15. Кольцепрокатные станы. Отличное качество для требовательных заказчиков. — SMS Meer, 2004. — 24 с.
16. Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцераскатки / В.Е. Антонюк, С.Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 3(52). — С. 34–41.

ANTONYUK Vladimir E., D. Sc. in Eng.

Chief Researcher of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering<sup>1</sup>

E-mail: vladi@tut.by

SANDOMIRSKI Sergei G., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering<sup>1</sup>

E-mail: sand\_work@mail.ru

RUDII Victor V., Ph. D. in Eng.

Chief Technologist<sup>2</sup>

E-mail: rvw@belaz.minsk.by

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>OJSC “BELAZ” — Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Republic of Belarus

Received 01 March 2021.

## TASKS OF TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THE AUTOMATED RING ROLLING COMPLEX

*The physical foundations and advantages of ring rolling are described. The materials science and technological processes of manufacture of products with its use are generalized. An analysis of the equipment of an automated ring rolling line was carried out, which showed that it is a complex and expensive technical solution. Moreover, the organization of the line with maximum load and efficiency is not included in the supplier's tasks. The requirements for the maximum load of the line and its efficient operation have been determined. It is shown that the use of the experience of creating automated production of railway wheels when creating an automated production of ring blanks is impossible due to the need to ensure the production of rings of different structural shapes from different steel grades with different temperature ranges of plastic deformation and with different (from a hundred to several thousands) annual production programs. This requires the use of a different ratio of the radial and axial forces of the ring rolling, different technological equipment, taking into account different stiffness of the rings and their tendency to deformations during processing, transportation and cooling, a special development of mechanization means for readjustments. It is impossible to work out in advance all the technological options for the production of rings of different standard sizes on an automated line. In this regard, for the effective work of the complex, it is necessary to develop technological support 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 for the operation of the automated ring rolling complex at the OJSC “BELAZ” were formulated.*

**Keywords:** ring blank, heating, pressing, rolling, modeling, plastic deformation

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-42-53>

### References

1. Marczinski H. Der Entwicklungsstand neuzeitlicher Ringwalzwerke. *Stahl und Eisen*, 1974, vol. 94, no. 24, pp. 1207–1211.
2. Werner W., Volkmar S. *Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften*. Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt, 2000. 5 p.
3. Kluge A., Faber H. Glühende Ringe – Das Ringwalzen als wichtiges Verfahren der Massivumformung. *MM Industrie Magazin*, 2005, pp. 26–31.
4. Antonyuk V.E., Vityaz P.A., Parkhomchik P.A., Rudy V.V., Shipko A.A. *Koltseraskatka v proizvodstve detaley mashinostroeniya* [Ring rolling in the manufacture of mechanical engineering parts]. Minsk, Belarusskaya navuka Publ., 2013. 188 p. (in Russ.).
5. Vveden v ekspluatatsiyu koltseraskatny kompleks Muraro [The Muraro ring rolling complex was put into operation]. *Gazeta Minskogo podshipnikovogo zavoda “Odinnadsat”*, 2017, no. 5(3229), pp. 1–3 (in Russ.).
6. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal shaping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 424 p. (in Russ.).
7. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I. *Teoriya prokatki* [Rolling theory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 335 p. (in Russ.).
8. Polukhin P.I., Gunn G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoy deformatsii metallov i splavov* [Resistance of metals and alloys to plastic deformation]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 352 p. (in Russ.).
9. *Kovka i shtampovka. T. 2. Goryachaya shtampovka* [Forging and stamping. Vol. 2. Hot stamping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 692 p. (in Russ.).
10. Groche P., Fritsche D. Inkrementelle Massivumformung. *Werkstattstechnik*, 2005, no. 10, pp. 798–802.
11. Doege E., Behrens B.-A. *Handbuch Umformtechnik*. Springer Verlag, 2007. 913 p.
12. Puller S. *Simulation des Werkstoffflusses beim Ringwalzen mittels elementarer Plastitätstheorie*. D. Sc. Thesis. Hannover, 2003. 110 p. Available at: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/6293> (accessed 03 March 2021).
13. Meier H., Pentleit A. Mechanisches Deformationsmodell für das Ringwalzen. Zur Berechnung der maximal zulässigen Zentrierarmkräfte beim Radial-Axial-Ringwalzen. *Werkstattstechnik wt-online*, 2003, vol. 93, no. 5, pp. 485–488.
14. Marchenko M. *Radial-Axial-Ringwalzen. Dynamische 3D-Visualisierung eines Radial-Axial-Ringwalzprozesses*. VDM Verlag Dr. Müller, 2010. 84 p.
15. *Koltseprokatnye stany. Otlichnoe kachestvo dlya trebovatelnykh zakazchikov* [Ring rolling mills. Excellent quality for demanding customers]. SMS Meer, 2004. 24 p. (in Russ.).
16. Antonyuk V.E., Sandomirski S.G. Dinamicheskaya stabilizatsiya malozhestkikh kolets posle kol'tseraskatki [Dynamic stabilization of rings of low rigidity after the ring rolling]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 3(52), pp. 34–41 (in Russ.).