



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-106-111>
УДК 621.81

Поступила 10.01.2023
Received 10.01.2023

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК ПОСЛЕ КОЛЬЦЕРАСКАТКИ

В. Е. АНТОНЮК, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sand_work@mail.ru
В. В. ЯВОРСКИЙ, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ–ХОЛДИНГ», г. Жодино, Беларусь, ул. 40 лет Октября

Выполнен анализ возможностей кольцераскатки в обеспечении повышенной точности кольцевых заготовок. Отмечена необходимость участия оператора в управлении кольцераскаткой для достижения требуемой точности даже при полной автоматизации процесса изготовления кольцевых заготовок. Отмечена необходимость управления процессом охлаждения кольцевых заготовок после кольцераскатки для обеспечения повышенной точности кольцевых заготовок. Для устранения овальности кольцевых заготовок малой жесткости после кольцераскатки предложено использовать технологию их управляемого охлаждения и стабилизации. Разработана последовательность управления тепловыми деформациями кольцевой заготовки в процессе охлаждения с целью сохранения достигнутой точности «горячего» кольца после кольцераскатки на «холодном» кольце после охлаждения.

Предложенные рекомендации предназначены для разработки технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса на ОАО «БЕЛАЗ».

Ключевые слова. Кольцевая заготовка, овальность, допуск, охлаждение, циклическое нагружение.

Для цитирования. Антонюк, В. Е. Технические особенности управляемого охлаждения кольцевых заготовок после кольцераскатки / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский, В. В. Яворский // *Литье и металлургия*. 2023. № 1. С. 106–111. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-106-111>.

TECHNICAL FEATURES OF CONTROLLED COOLING OF CIRCULAR WORKPIECES AFTER RING ROLLING

V. E. ANTONYUK, S. G. SANDOMIRSKI, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sand_work@mail.ru
V. V. YAVORSKI, OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ–HOLDING”, Zhodino, Belarus, 40 let Ocyabrya str.

The analysis of the ring rolling machine capabilities in providing increased accuracy of ring blanks is performed. The necessity of operator's participation in controlling the ring rolling machine to achieve the required accuracy even with full automation of the ring blanks manufacturing process is noted. The necessity of controlling the process of cooling of circular blanks after the circular rolling machine to ensure increased accuracy of the circular blanks has been noted. To eliminate the ovality of low rigidity ring blanks after the circular rolling mill it is proposed to use the technology of their controlled cooling and stabilization. The sequence of thermal strain control of the ring blanks during cooling to preserve the achieved accuracy of the “hot” ring after the ring rolling on the “cold” ring after cooling has been developed. The proposed recommendations are intended for the development of technological support for automated ring rolling complex at OJSC “BELAZ”.

Keywords. Ring billet, ovality, tolerance, cooling, cyclic loading.

For citation. Antonyuk V. E., Sandomirski S. G., Yavorski V. V. Technical features of controlled cooling of circular workpieces after ring rolling. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 106–111. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-106-111>.

Введение

Производство заготовок бесшовных колец достигает 16% от общего объема производства кузнечных заготовок. Ассортимент изготавливаемых колец непрерывно расширяется как по применяемым материалам, так и по форме и размерам [1]. Оптимизация – важное условие эффективности процесса кольцераскатки по сравнению с другими методами получения кольцевых деталей. Результатом оптимизации процесса кольцераскатки является достижение конечной формы кольца при минимальных затратах

на энергетические ресурсы и максимальном коэффициенте использования материала. Современные процессы и машины для кольцераскатки используют системы с числовым программным управлением (ЧПУ). Это позволило создавать принципиально новые типы кольцераскатных машин с системами управления процессом кольцераскатки на основе компьютерной техники [2, 3].

В ближайшие годы в составе Белорусского автомобильного завода будет создан уникальный автоматизированный комплекс для производства кольцевых заготовок с наружным диаметром от 350 до 3000 мм и массой до 3000 кг [4]. Этот комплекс не только будет удовлетворять потребности белорусских предприятий в кольцевых заготовках, но и поставлять их на экспорт. Для экспортных поставок важно достижение высокой точности, которая при изготовлении кольцевых заготовок на автоматизированной линии зависит от ряда факторов. Поставщики кольцераскатного оборудования ее не гарантируют. Особенностью кольцераскатного оборудования являются системы ЧПУ для управления процессом кольцераскатки «горячего» кольца. Но дальнейшее обеспечение точности «холодного» кольца не входит в задачи поставщиков оборудования и становится задачей покупателей. Общение с компаниями, поставляющими кольцераскатное оборудование, показало, что имеющийся опыт его эксплуатации и достижения точности они считают ноу-хау. Этот опыт они не раскрывают даже для покупателей оборудования.

Целью статьи является разработка рекомендаций по управлению тепловыми деформациями кольцевой заготовки в процессе охлаждения для сохранения точности «горячего» кольца после кольцераскатки на «холодном» кольце после охлаждения.

Достижимую точность кольцераскатки разделяют на точность «горячего» кольца с температурой 900–800 °С и «холодного» кольца с температурой 250–60 °С.

Все современные кольцераскатные станы имеют системы ЧПУ, которые позволяют вести наблюдение за геометрическими параметрами «горячего» кольца и корректировать режимы кольцераскатки в зависимости от требований по точности и производительности. На рис. 1 показан вид экранов на двух мониторах в системе CARWIN, где отражены основные движения инструментов и заготовки, изменения сечения кольца, усилия на роликах и температура кольца, что позволяет оператору следить за процессом кольцераскатки в реальном времени [5].

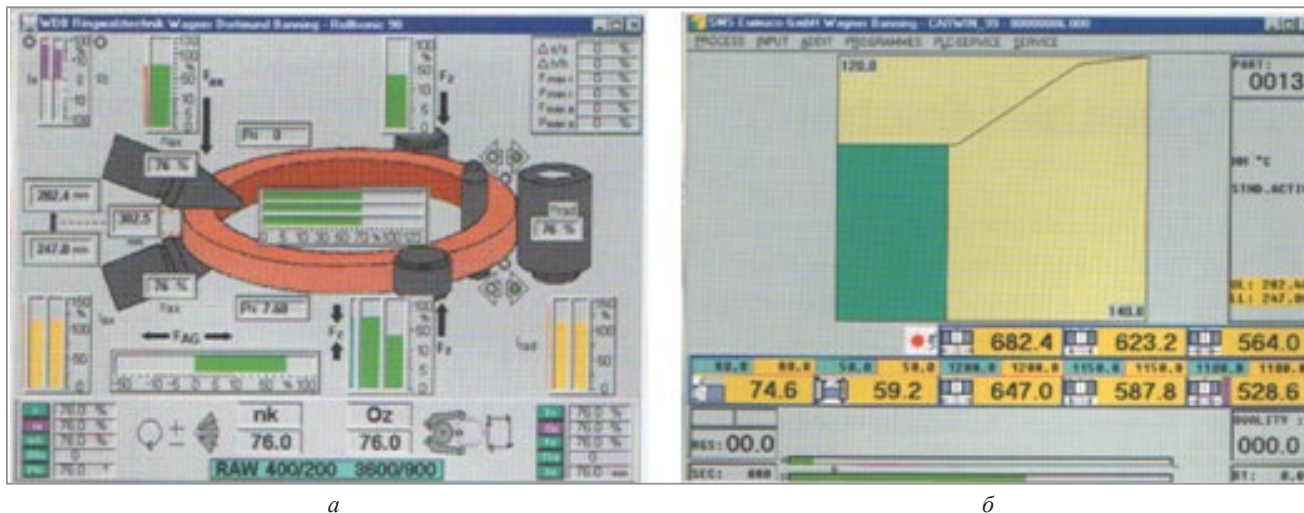


Рис. 1. Экраны в системе CARWIN для управления кольцераскатным станом:
а – положения инструмента и заготовки; *б* – изменения сечения кольца

Но управление процессом кольцераскатки даже в автоматизированной линии обязательно осуществляет оператор. Изготовление первой кольцевой заготовки производят опытным путем с введением расчетных показателей кольцераскатки, но с ручным управлением процессом кольцераскатки с корректировкой расчетных показателей для достижения заданных геометрических параметров «горячего» кольца. После изготовления первого «горячего» кольца следуют охлаждение и контроль геометрических параметров «холодного» кольца. По данным контроля «холодного» кольца следуют корректировка геометрических параметров «горячего» кольца и кольцераскатка следующих опытных колец до тех пор, пока не будет достигнута требуемая геометрическая точность «холодного» кольца. При достижении положительных результатов система управления кольцераскатным станом позволяет запомнить ручной режим кольцераскатки и в дальнейшем использовать его как автоматический режим при повторном

изготовлении тех же колец. Но даже при первом отработанном режиме кольцеракатки геометрические параметры «горячих» и «холодных» колец будут иметь определенный разброс результатов измерений. Это связано с тем, что все исходные операции до кольцеракатки (резка заготовки, нагрев, прессование) имеют свои допуски, в пределах которых происходит изготовление одной партии колец.

При повторном изготовлении таких же колец окончательные геометрические размеры и точность изготовленных колец также могут не соответствовать достигнутому при изготовлении первой партии, так как система управления кольцеракатным станом запомнила только режимы кольцеракатки, а режимы охлаждения кольца входят в другую систему управления и могут изменяться. Также в пределах заданных допусков могут меняться исходные параметры материала кольцевой заготовки (прочностные и структурные характеристики), режимы нагрева, температура и масса заготовки перед кольцеракаткой, которые будут влиять на процесс и результаты кольцеракатки. В результате «горячие» кольцевые заготовки после кольцеракатки будут иметь разные геометрические параметры и разную температуру. Если дальнейшее охлаждение «горячих» кольцевых заготовок проводить при неизменном технологическом режиме охлаждения, то погрешности «холодных» кольцевых заготовок только увеличатся по сравнению с «горячими».

Обеспечение высокой точности «холодного» кольца остается до сих пор сложной задачей для изготовителей кольцевых заготовок. Большинство поставщиков точных кольцевых заготовок проводит предварительную механическую обработку и разные виды контроля на отсутствие поверхностных и внутренних дефектов. Погрешности изготовления такой заготовки устраняют за счет увеличения припусков под механическую обработку. Для изготовителей кольцевых заготовок это менее затратно по сравнению с поисками путей повышения точности при кольцеракатке и последующем охлаждении.

Но в случае изготовления кольцевых заготовок из высоколегированных сталей для ответственных изделий большие припуски под механическую обработку не допускают, так как они приводят к нарушению волокнистости структуры после кольцеракатки. Для таких кольцевых заготовок согласовывают весь технологический процесс кольцеракатки и охлаждения с достижением требуемых результатов по точности. Кроме того, при необходимости использования кольцевых заготовок из дорогих легированных сталей менее затратным становится изготовление точных профильных заготовок.

В связи изложенным выше для повышения точности кольцевых заготовок малой жесткости путем устранения наиболее часто встречающейся после кольцеракатки погрешности в виде овальности предлагаем технологию их охлаждения и стабилизации. Предлагаемая технология основана на управлении тепловыми деформациями кольцевой заготовки в процессе охлаждения с целью сохранения достигнутой точности «горячего» кольца после кольцеракатки на «холодном» кольце после охлаждения.

Тепловой режим и деформации кольцевых заготовок. Кольцевая заготовка на кольцеракатку поступает с температурой 1200–1050 °С в зависимости от марки стали и массы заготовки. После кольцеракатки «горячее» кольцо имеет температуру 1000–900 °С. При охлаждении «горячее» кольцо претерпевает термическую усадку. Поэтому геометрические параметры «горячих» колец (наружный и внутренний диаметр, высота и толщина стенки) после кольцеракатки надо задавать больше размеров «холодного» кольца. Это условие знают все изготовители кольцевых заготовок и предварительно задают параметры «горячего» кольца на 1,3–1,6% больше, чем «холодного». Но это – теоретическая разница. Параметры «горячего» кольца всегда экспериментально уточняют по результатам измерения «холодных» колец. В зависимости от того, какие будут действительные коэффициенты линейного расширения материала колец, какие будут перепады температур до и после кольцеракатки, какое будет охлаждение – результаты усадки колец будут разные. Соответственно разной будет и их окончательная точность.

Сегодня никто не может точно предсказать достижимый результат по точности для группы маложестких колец. При проектировании технологии кольцеракатки и охлаждения этих колец должна быть предусмотрена возможность влияния на технологию охлаждения и усадки колец, которая позволяла бы влиять на достижение окончательной точности.

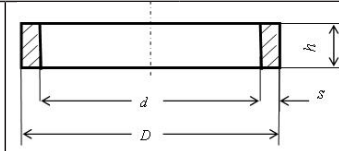
Управляемое охлаждение кольцевых заготовок. Сущность управляемого охлаждения заключается в охлаждении кольцевых заготовок с одновременным воздействием на их циклического нагружения при постоянной величине заданного геометрического параметра кольцевой заготовки.

Предлагаемая технология управляемого охлаждения принципиально отличается от экспандирования, при котором происходит непрерывное статическое нагружение и изменение диаметра кольцевой заготовки. Также она отличается от известных методов охлаждения кольцевых заготовок в туннелях и стопках, при которых происходит не контролируемая усадка с образованием дополнительных погрешностей формы кольцевой заготовки.

Сущность управляемого охлаждения поясним на примере охлаждения маложестькой кольцевой заготовки с нагружением при постоянной величине заданного внутреннего диаметра кольцевой заготовки. Геометрические параметры «холодной» и «горячей» кольцевой заготовки приведены в табл. 1.

В выбранном примере постоянной величиной заданного внутреннего диаметра кольцевой заготовки будет максимальный внутренний диаметр 2195,5 мм. Предполагаем, что «горячая» кольцевая заготовка изготовлена после кольцераскатки с точностью внутреннего диаметра по степени IT 16 $2223 \pm 5,5$ мм с овальностью внутреннего диаметра в пределах допуска на диаметр 11 мм.

Таблица 1. Параметры «холодной» и «горячей» кольцевой заготовки

Параметры кольцевой заготовки		
	«Холодная»	«Горячая»
Наружный диаметр D , мм	2555	2593
Внутренний диаметр d , мм	$2190 \pm 5,5$	$2223 \pm 5,5$
Высота h , мм	195	198
Допуск на овальность внутреннего диаметра, мм	2	11

Для последующего управляемого охлаждения кольцевой заготовки с нагружением при постоянной величине заданного внутреннего диаметра применим устройство, базирующееся на использовании рычажно-шарнирного механизма, функциональная схема которого представлена на рис. 2 [6, 7].

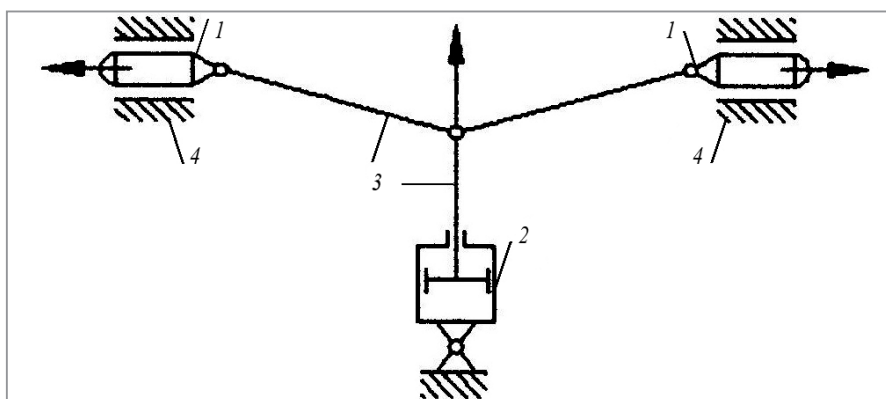


Рис. 2. Схема использования рычажно-шарнирного механизма:

1 – плунжеры; 2 – гидропривод; 3 – рычажно-шарнирный механизм; 4 – корпус

Использование рычажно-шарнирного механизма автоматически решает основные проблемы нагружения кольцевой заготовки:

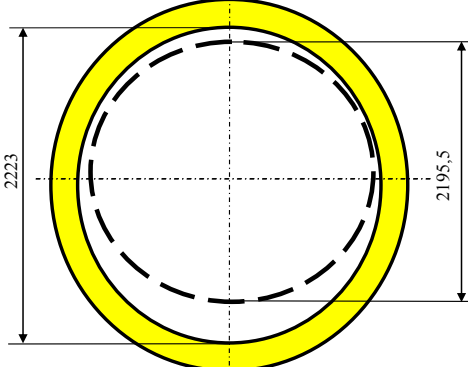
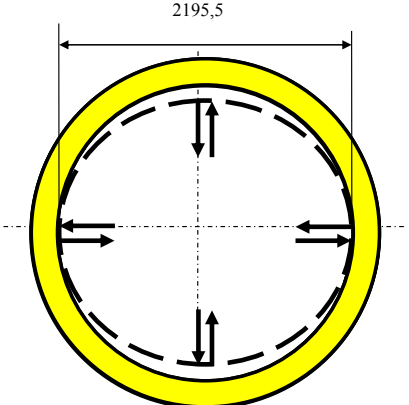
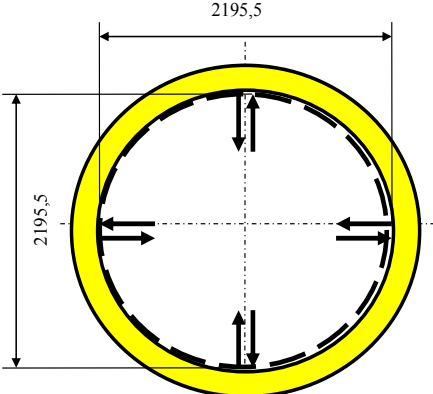
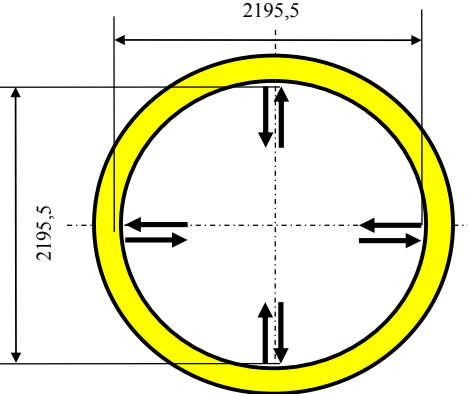
- максимальное усилие создается только в конце нагружения;
- ускоренное перемещение плунжера в начале нагружения и замедленное в конце рабочего хода происходит автоматически вследствие переменного передаточного отношения между усилием на цилиндре привода и усилием на плунжере.

После кольцераскатки «горячее» кольцо с температурой 1026 °С с исходной погрешностью внутреннего диаметра помещается на устройство с положением плунжеров в максимально разжатом положении с размером, равным верхнему допуску на внутренний диаметр холодного кольца, $2190 + 5,5 = 2195,5$ мм. Затем включается возвратно-поступательное движение плунжеров и «горячее» кольцо начинает охлаждаться и нагружаться циклической растягивающей нагрузкой, происходит усадка кольца и после уменьшения внутреннего диаметра кольца при минимальном размере овала до размера $2195,5$ мм полугорячее кольцо входит в контакт с плунжерами устройства на диаметре $2195,5$ мм с одной парой плунжеров.

При дальнейшем охлаждении происходит нагружение кольца следующими парами плунжеров и овальность полностью устраняется при максимальном выдвигании плунжеров на диаметр $2195,5$ мм. Кольцевая заготовка к этому моменту охладилась и при отводе плунжеров может частично возникать овальность. Для полного исключения овальности продолжается нагружение полугорячей кольцевой

заготовки до полного охлаждения. В табл. 2 приведена последовательность управляемого охлаждения кольцевой заготовки. Для расчета силовых параметров процесса и устройства управляемого охлаждения можно воспользоваться информацией, приведенной в [6–9].

Таблица 2. Последовательность охлаждения и нагружения кольцевой заготовки

Последовательность	Эскиз
<p>Горячее кольцо с температурой 1026 °С после кольцеразкатки с исходной погрешностью внутреннего диаметра помещается на устройство с положением плунжеров в максимально разжатом положении с размером, равным верхнему допуску на внутренний диаметр холодного кольца, $2190 + 5,5 = 2195,5$ мм</p>	
<p>Горячее кольцо начинает охлаждаться, овальность после кольцеразкатки сохраняется и после уменьшения внутреннего диаметра в минимальном размере овала до размера 2195,5 мм еще полугорячее кольцо входит в контакт с плунжерами диаметром 2195,5 мм. В это время включается возвратно-поступательное движение плунжеров и полугорячее кольцо начинает нагружаться циклической нагрузкой</p>	
<p>Полугорячее кольцо продолжает охлаждаться, овальность уменьшается до минимального значения при полном контакте внутреннего диаметра кольца с плунжерами диаметром 2195,5 мм. Возвратно-поступательное движение плунжеров продолжается и кольцо продолжает нагружаться циклической нагрузкой</p>	
<p>Полугорячее кольцо продолжает охлаждаться до холодного состояния, овальность уменьшилась до минимального значения, происходит полный контакт внутреннего диаметра кольца с плунжерами, внутренний диаметр кольца по мере охлаждения кольца до температуры порядка 150 °С продолжает уменьшаться в пределах заданного допуска на внутренний диаметр $2190 \pm 5,5$ мм. Возвратно-поступательное движение плунжеров продолжается, кольцо продолжает нагружаться циклической нагрузкой и происходит снятие остаточных напряжений</p>	

Выводы

1. Выполнен анализ возможностей кольцераскатки в обеспечении повышенной точности кольцевых заготовок и отмечена необходимость участия оператора в управлении процессом кольцераскатки для достижения требуемой точности даже при полной автоматизации процесса изготовления кольцевых заготовок.
2. Отмечена необходимость управления процессом охлаждения кольцевых заготовок после кольцераскатки при обеспечении повышенной точности заготовок.
3. Предложено для управления процессом охлаждения кольцевых заготовок использовать технологию охлаждения и стабилизации кольцевых заготовок малой жесткости для устранения наиболее часто встречающейся погрешности в виде овальности после кольцераскатки.
4. Разработана последовательность управления тепловыми деформациями кольцевой заготовки в процессе охлаждения с целью сохранения достигнутой точности «горячего» кольца после кольцераскатки на «холодном» кольце после охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Werner, W.** Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften / W. Werner, S. Volkmar // Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt. 2000. 5 p.
2. **Hulshorst, T.** Erhöhung der Prozessstabilität beim Ringwalzen durch adaptive Regelung der Ringlage / T. Hulshorst // Verlag Shaker. 2004. 164 p.
3. **Kneissler, A.** MultisensorStrategie zur Optimierung des Anwalzverhaltens beim RadialAxialRingwalzen / A. Kneissler // Verlag: Shaker. 2009. 162 p.
4. ОАО «БЕЛАЗ» построит современный комплекс кольцераскатки в Орше. Режим доступа: <https://vitvesti.by/economy/belaz-postroit-v-orshe-sovremennyi-koltceraskatnyi-kompleks.html/>. Дата доступа: 03.01.2023.
5. Ringwalzwerk // [Electronic resource]. Mode of access: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ringwalzwerk>. – Date of access: 03.01.2023.
6. **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.
7. **Антонюк, В. Е.** Особенности экспандирования маложестких колец в кольцераскатных комплексах / В. Е. Антонюк, А. В. Будзинская, В. В. Яворский // Актуальные вопросы машиноведения. 2020. Вып. 9. С. 319–322.
8. **Антонюк, В. Е.** Методика расчета напряженного состояния кольца при реализации циклического напряжения / В. Е. Антонюк, В. В. Яворский // Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Вып. 8. С. 286–288.
9. **Антонюк, В. Е.** Силовые параметры калибрования бесшовных колец в кольцераскатных комплексах / В. Е. Антонюк, В. В. Яворский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020.

REFERENCES

1. **Werner W., Volkmar S.** Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften. Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt, 2000, 5 p.
2. **Hulshorst T.** Erhöhung der Prozessstabilität beim Ringwalzen durch adaptive Regelung der Ringlage. Verlag Shaker, 2004, 164 p.
3. **Kneissler A.** Multisensor Strategie zur Optimierung des Anwalzverhaltens beim Radial Axial Ringwalzen. Verlag: Shaker, 2009, 162 p.
4. <https://vitvesti.by/economy/belaz-postroit-v-orshe-sovremennyi-koltceraskatnyi-kompleks.html/>.
5. <https://de.wikipedia.org/wiki/Ringwalzwerk>.
6. **Antonyuk V.E., Sandomirski S.G.** Dinamicheskaja stabilizacija malozhestkih kolec posle kol'ceraskatki [Dynamic stabilization of low-rigid rings after ring rolling.]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 3 (52), pp. 34–41.
7. **Antonyuk V.E., Budzinskaja A.V., Javorski V.V.** Osobennosti jekspandirovanija malozhestkih kolec v kol'ceraskatnyh kompleksah [Peculiarities of expansion of low-rigid rings in ring-rolling complexes]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija = Topical issues of mechanical engineering*, 2020, vyp. 9, pp. 319–322.
8. **Antonyuk V.E., Javorski V.V.** Metodika rascheta naprjazhennogo sostojanija kol'ca pri realizacii ciklicheskogo naprjazhenija [Method for calculating the stress state of the ring in the implementation of cyclic stress]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija = Topical issues of mechanical engineering*, 2019, vyp. 8, pp. 286–288.
9. **Antonyuk V.E., Javorski V.V.** Silovye parametry kalibrovaniija besshovnyh kolec v kol'ceraskatnyh kompleksah [Force parameters of calibration of seamless rings in ring-rolling complexes]. *Materialy, oborudovanie i resursosberegajushhie tehnologii = Materials, equipment and resource-saving technologies*, Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2020, 539 p.