



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-121-129>
УДК 621.735.34

Поступила 22.11.2021
Received 22.11.2021

ТРЕБОВАНИЯ К ВЫБОРУ МАССЫ И НАГРЕВУ ЗАГОТОВОК В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОЛЬЦЕРАСКАТНЫХ КОМПЛЕКСАХ

*В. Е. АНТОНЮК, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, ГНУ «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,
Н. П. ТИМОШЕНКО, А. В. БУДЗИНСКАЯ, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12.*

Рассмотрены условия выбора массы заготовки для изготовления кольцевой детали на автоматизированном кольце­раскатном комплексе, особенности нагрева заготовок в условиях автоматизированной линии и термической обра­ботки изготовленных деталей. Обоснована целесообразность дифференцированного назначения допусков на размеры колец после кольце­раскатки в зависимости от их типа, условий последующей механической обработки и эксплуатации. Акцентировано внимание на необходимости проектирования технологии кольце­раскатки с контролем параметров за­готовки не только на операциях резки, нагрева и прессования, но и перед операцией кольце­раскатки, особенно при использовании повторного нагрева. Для оценки технологического температурного состояния кольцевых заготовок на раз­ных стадиях изготовления в условиях автоматизированной линии предложено использовать «условную температуру» заготовки, которая определяется во 2-й зоне от середины заготовки. Обосновано использование однократного газового нагрева заготовок в печах с вращающимся подом при изготовлении кольцевых заготовок на автоматизированной ли­нии. Определены проблемы синхронизации работы автоматизированной линии кольце­раскатки и комплекса термиче­ской обработки. Показано, что тактовая производительность автоматизированной линии кольце­раскатки суще­ственно превышает тактовую производительность планируемого комплекса термической обработки. Сделан вывод о необходимости разработки программного обеспечения для их синхронной работы.

Предложенные рекомендации предназначены для разработки технологического обеспечения автоматизированного кольце­раскатного комплекса на ОАО «Завод ПАК» в составе «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ».

Ключевые слова. Кольцевая заготовка, масса, допуск, нагрев, прессование, раскатка, пластическое деформирование, тер­мическая обработка.

Для цитирования. Антонюк, В. Е. Требования к выбору массы и нагреву заготовок в автоматизированных кольце­раскат­ных комплексах / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский, В. В. Яворский, Н. П. Тимошенко, А. В. Будзинская // *Литье и металлургия*. 2022. № 1. С. 121–129. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-121-129>.

REQUIREMENTS FOR THE MASS AND HEATING OF BLANKS SELECTION IN AUTOMATED RING-ROLLING COMPLEXES

*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. YAVORSKY, OJSC “BELAZ” – Management Company of the Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Belarus
N. P. TIMOSHENKO, A. V. BUDZINSKAYA, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str.*

The conditions for choosing a billet mass for the manufacture of an ring part on an automated ring-rolling complex, the fea­tures of heating the billets in the conditions of an automated line and heat treatment of manufactured parts are considered. The expediency of differentiated assignment of tolerances for the rings' sizes after ring rolling, depending on their type, conditions of subsequent mechanical treatment and operation, is substantiated. Attention is focused on the need to design a ring-rolling tech­nology with control of the billet parameters not only during the cutting, heating and pressing operations, but also before the ring-rolling operation, especially when using reheating. To evaluate the technological temperature state of the ring blanks at different stages of manufacturing in an automated line, it is offered to use the billet's “conventional temperature”, which is deter­mined in the 2nd zone from the middle of the billet. The use of single gas heating of billets in rotary-hearth furnaces in the manu­facture of annular billet on an automated line is justified. The problems of the automated ring rolling line and the heat treatment

complex synchronization are determined. It is shown that the clock capacity of the automated ring rolling line significantly exceeds the clock capacity of the planned heat treatment complex. It is concluded that it is necessary to develop software for their synchronous operation.

The proposed recommendations are intended for the development of technological support for an automated ring-rolling complex at OJSC "PAK Plant" as part of "BELAZ-HOLDING".

Keywords. Ring billet, mass, tolerance, heating, pressing, rolling, plastic deformation, heat treatment.

For citation. Antonyuk V.E., Sandomirski S.G., Yavorsky V.V., Timoshenko N.P., Budzinskaya A.V. Requirements for the mass and heating of blanks selection in automated ring-rolling complexes. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 1, pp. 121–129. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-121-129>.

Введение

Кольцеракатка [1] позволяет создать ответственные детали машиностроения с высокими точностью и механическими свойствами [2]. В мире освоена кольцеракатка деталей внешним диаметром D до 15 м, высотой h до 3,5 м и массой m до 30 т. В Европе работает более 30 кольцеракатных производств. Но только две линии изготовления заготовок подшипников являются автоматизированными: линия компании «ОВАКО» (Швеция) с D до 1200 мм и линия на Минском подшипниковом заводе с D до 600 мм [3]. В Беларуси изготавливается большое количество деталей в форме колец, гильз и дисков. Но машиностроение Беларуси недостаточно использует технологии кольцеракатки. Поэтому в «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» на ОАО «Завод ПАК» в Орше запланировано [4] создание автоматизированного кольцеракатного комплекса для производства колец диаметром до 3000 мм.

Кольцевые заготовки могут иметь форму дисков, колец и гильз. Предполагается использовать преимущественно прямоугольный профиль их сечения. Но требования к изготовлению колец сложного профиля на наружном и внутреннем диаметрах также закладываются. В автоматизированной линии выполняют операции резки, нагрева, пластического деформирования на прессе и кольцеракатном стане, перемещения, контроля, охлаждения, маркировки [1]. Заготовки, находящиеся в температурном диапазоне от холодного состояния до 1250 °С, подвергаются деформированию при обработке, перемещении и охлаждении. Особенностью автоматизированной кольцеракатной линии на ОАО «Завод ПАК» является требование управления технологическим процессом с использованием программного обеспечения без участия операторов, которым отводится роль наблюдения и вмешательства в процесс лишь при необходимости. Особенностью автоматизированной линии для термической обработки кольцевых заготовок является синхронная работа с автоматизированной линией кольцеракатки. В мировой практике нет аналогов создаваемого автоматизированного комплекса кольцеракатки и термической обработки.

Общение с зарубежными компаниями, поставляющими кольцеракатное оборудование, показало, что их опыт эксплуатации оборудования является ноу-хау этих фирм. Они не делятся им даже с заказчиками оборудования. Проведенный анализ информации о методах получения кольцевых заготовок показал, что для решения этой проблемы необходима не только закупка современного оборудования, но и разработка научных основ технологии кольцеракатки применительно к создаваемому автоматизированному кольцеракатному комплексу.

Цель научного исследования – разработка и обоснование рекомендаций по решению проблем автоматизированного кольцеракатного производства: выбора массы заготовки и назначения допусков на окончательное кольцевое изделие, выбора технологии и оборудования для нагрева, синхронизации автоматизированной линии кольцеракатки с автоматизированным комплексом термической обработки.

Особенности расчета исходной массы заготовки для автоматизированного кольцеракатного комплекса

В кольцеракатке используют положения технологии кузнечных производств по резке и нагреву заготовок, очистке от окалины, условиям пластического деформирования. Но есть принципиальные отличия формирования кольца кольцеракаткой: при кузнечной обработке происходит контакт заготовки с инструментом по всей поверхности заготовки. При кольцеракатке формирование наружного и внутреннего диаметров и высоты кольца происходит пластическим деформированием кольцевой заготовки только в локальной зоне контакта заготовки с радиальными и осевыми инструментами. При кузнечной обработке тел вращения лишнюю массу заготовки перемещают в заранее предусмотренный облой [5]. При кольцеракатке всю массу (весь объем материала) кольцевой заготовки перераспределяют в окончательную кольцевую заготовку. Излишки массы уйдут в излишние высоту и толщину детали.

В автоматизированном кольцераскатном комплексе технология изготовления колец основана на минимальном вмешательстве оператора. Поэтому решение по использованию «излишней массы» заготовки должно быть введено в систему управления автоматизированным комплексом. Рассмотрим (рис. 1) технологию изготовления кольцевых заготовок в автоматизированной линии [6].

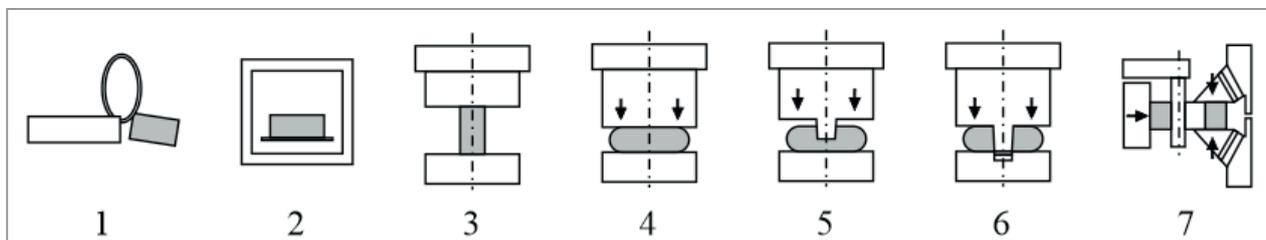


Рис. 1. Технологический процесс изготовления кольцевых заготовок:

1 – резка заготовок; 2 – нагрев; 3 – подача на пресс; 4 – осадка; 5 – наметка отверстия; 6 – прошивка отверстия; 7 – кольцераскатка

Достижимую точность колец в горячем состоянии можно оценить по квалитетам IT15 – IT16 ГОСТа [1]. Пока нет программ управления кольцераскаткой, которые автоматически устраняют возможные погрешности кольца. Для этого необходимо участие оператора.

При изготовлении кольцевой заготовки происходит непрерывное изменение размеров и массы кольца. Масса окалины составляет от 1,1 до 2,0% от массы заготовки, допуск на массу заготовки после отрезки может достигать 0,2%, масса выдры также не постоянная величина [5]. Поэтому к операции кольцераскатки масса заготовки может отличаться от расчетной до 0,5%. Методику расчета массы заготовки рассмотрим на примере окончательной кольцевой заготовки с прямоугольным сечением (рис. 2).

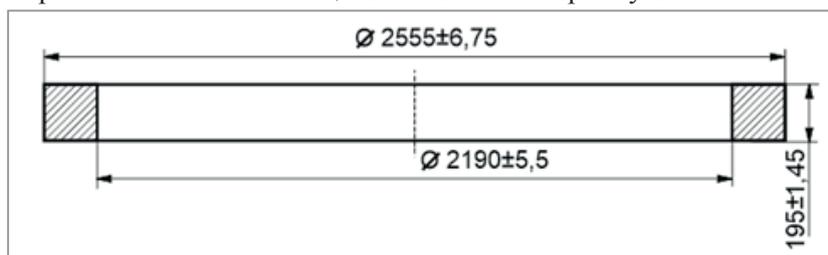


Рис. 2. Эскиз окончательной кольцевой заготовки с прямоугольным сечением

Рассчитаем максимальную, номинальную и минимальную массу окончательных кольцевых заготовок исходя из заданных размеров окончательной кольцевой заготовки и назначенных допусков (рис. 2). Результаты расчетов приведены в табл. 1, согласно которой расчетные массы окончательной кольцевой заготовки в пределах заданных допусков по квалитету IT16 отличаются от номинальной массы до 86,5 кг.

Таблица 1. Расчетные массы при допустимых размерах окончательной кольцевой заготовки

Параметры	Геометрические параметры окончательной кольцевой заготовки, мм			Масса m окончательной заготовки, кг
	Внешний диаметр D	Внутренний диаметр d	Высота h	
Номинальные	$D_{\text{ном}} = 2555,00$	$d_{\text{ном}} = 2190,0$	$h_{\text{ном}} = 195,00$	2082,2
Минимальные в пределах допусков	$D_{\text{min}} = 2548,25$	$d_{\text{max}} = 2195,5$	$h_{\text{min}} = 193,55$	1996,8
Максимальные в пределах допусков	$D_{\text{max}} = 2548,25$	$d_{\text{min}} = 2195,5$	$h_{\text{max}} = 193,55$	2168,7

Перед разработчиками технологии кольцераскатки автоматизированной линии стоит задача: обеспечить точность по квалитету IT16 на высоту, наружный и внутренний диаметры окончательной кольцевой заготовки. Эту задачу предполагают выполнить, используя для кольцераскатки кольцевую заготовку с номинальной массой. Но задача трудновыполнима, потому что процесс реализуется с заданным тактовым временем [6]. Расчетные параметры кольца и технологические параметры кольцераскатки заранее вводят в систему программного управления кольцераскаткой и оператору отводится роль наблюдателя. Но это возможно только после предварительных испытаний и уточнения экспериментальным путем расчетных технологических параметров кольцераскатки. В условиях автоматизированной линии

проведение экспериментов исключается и все заданные в системе управления технологические параметры кольцераскатки могут корректироваться оператором только в ограниченном диапазоне без изменения заданного цикла работы линии.

Рассмотрим варианты кольцераскатки заготовки (см. рис. 1) массой 2082,2 кг (табл. 1).

По первому варианту оператор вначале выдержал в допуске минимально допустимый внутренний диаметр 2184,5 мм и максимально допустимый наружный диаметр 2561,75 мм. В этом случае при массе заготовки 2082,2 кг удается обеспечить высоту кольца 188,6 мм. Это меньше требуемой минимальной высоты 193,55 мм, т.е. из заготовки массой 2082,2 кг невозможно изготовить кольцо с допуском по наружному диаметру $2555+6,75$ мм и с допуском по внутреннему диаметру $2190-5,5$ мм с обеспечением заданной высоты $195\pm 1,45$ мм.

По второму варианту оператор вначале выдержал в допуске максимально допустимый внутренний диаметр 2195,5 мм и минимально допустимый наружный диаметр 2548,25 мм. В этом случае при использовании массы заготовки 2082,2 кг высота кольца составит 201,8 мм, что больше допускаемой максимальной высоты 196,45 мм. Получается, что из заготовки массой 2082,2 мм нельзя изготовить кольцо с заданным допуском по наружному и внутреннему диаметрам с обеспечением заданной высоты $195\pm 1,45$ мм.

Таким образом, используя заготовку с расчетной массой 2082,2 кг, при некоторых допустимых размерах по диаметрам не удастся попасть в поля допусков по высоте. Возникает вопрос: с какой точностью должны быть изготовлены наружный диаметр, внутренний диаметр и высота кольца, если использована заготовка массой 2082,2 кг.

В табл. 2 приведен вариант расчета требуемой точности изготовления кольца по наружному и внутреннему диаметру при обеспечении точности высоты кольца по качеству IT16 при заданной номинальной массе. Но задача обеспечения допуска на наружный и внутренний диаметр в пределах качества IT11 практически не выполнима.

Таблица 2. Варианты требуемой точности на наружный и внутренний диаметр кольца при достижении качества IT16 на высоту кольца при заданной номинальной массе заготовки

Геометрические параметры кольца	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм	Номинальная масса, кг
Возможный диапазон допусков при использовании номинальной массы	$2555\pm 1,4$	$2190\pm 1,4$	$195\pm 1,5$	2082,2

Стратегия нагрева применительно к условиям автоматизированной линии

Нагрев заготовок для кольцераскатных комплексов осуществляют с использованием газовых камерных печей, печей с вращающимся подом и индукционного нагрева. Как правило, изготовление кольца происходит с одноразового нагрева заготовки. В случае изготовления колец из сталей с высоким содержанием титана и никеля, а также сложнопрофильных колец с относительно тонкой стенкой используют дополнительный нагрев после прессования.

При выборе способа и температуры нагрева заготовки надо знать максимальную температуру нагрева заготовки в печи, температуры начала и окончания прессования и кольцераскатки. Процесс изготовления кольца включает получение предварительной формы кольца на прессе с последующей раскаткой с одного нагрева заготовки. Поэтому форма заготовки оказывает большое влияние на операции кольцераскатки. Температура нагрева заготовки всегда будет выше температуры заготовки перед прессом, а 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.

При нагреве заготовок под кольцераскатку должна быть обеспечена равномерная температура по поверхности и сечению заготовки, минимальное окисление, отсутствие трещин. Для выполнения этих условий различают технически возможную (определяется разностью температуры печи и конечной температуры поверхности заготовки) и технически допустимую скорость нагрева. Нагрев заготовок диаметром более 250 мм следует вести со скоростью нагрева, приведенной в табл. 3 [5].

Для нагрева заготовок колец средних и больших диаметров используют нагрев в газовых печах (преимущественно используются печи с вращающимся подом). Для работы автоматизированной линии желательнее использование однократного нагрева. Задачей системы нагрева и очистки заготовок от окалина в составе автоматизированной линии является подача заготовок к прессу с заданной температурой

с расчетным тактовым временем. Время общего нагрева заготовки включает время на выдержку при температуре посадки в печь, время нагрева до температурыковки и время выдержки при температурековки. Заданные параметры температуры и тактового времени должны обеспечиваться системой управления при минимальном вмешательстве оператора. Этого позволяет добиться включение в систему ЧПУ контроля циклового времени и контроля температуры кольца на каждой операции, снижает стоимость и затраты на эксплуатацию, упрощает обслуживание линии.

Таблица 3. Общая продолжительность нагрева заготовок

Тип сталей	Температура печи при посадке заготовки, °С	Диаметр заготовки, мм	Продолжительность нагрева, ч	
			одной заготовки	при полной загрузке печи
Низкоуглеродистые и низколегированные	1250	201–250	1,5	3,5
		251–300	2	4
		301–350	2,7	6
Среднеуглеродистые и легированные	1150	201–250	2,5	5
		251–300	3	6
		301–350	3,5	7
Высоколегированные	700	201–250	3,5	7
		251–300	4	8
		301–350	4,5	9

Требованиями поставки автоматизированной кольцераскатной линии для Белорусского автомобильного завода не оговорена необходимость повторного нагрева после прессы до кольцераскатки, но сформулировано требование поставки такой технологии и оборудования для нагрева, которая в конечном итоге обеспечит изготовление колец с параметрами по степени точности IT16 по DIN 7175. Особенностью создаваемой линии является требование изготовления колец массой от 5 до 3000 кг. На наиболее автоматизированной линии OVACO масса изготавливаемых колец составляет от 50 до 250 кг. Это привело к необходимости расчетного обоснования выбора технологии нагрева при изготовлении колец по заданной номенклатуре, но с использованием поставляемого оборудования в составе линии.

Моделирование нагрева с учетом особенности кольцераскатной автоматизированной линии для Белорусского автомобильного завода

Для разработки параметров нагрева заданной номенклатуры и марок сталей колец для изготовления на кольцераскатной автоматизированной линии были приняты минимальные температуры окончания интенсивного пластического деформирования, которые приведены в табл. 4 [5].

«Температура нагрева» заготовки означает ту технологическую температуру, которая задается режимом печи с вращающимся подом или камерной печи. На выходе из печи заготовка имеет температуру, отличающуюся на допустимое отклонение по технологическому процессу нагрева примерно на 10 °С. При нагреве заготовок в печи с вращающимся подом или камерной печи время нагрева составляет от 6 до 12 ч, и заготовки имеют одинаковую температуру по всему сечению. Начиная с операции очистки заготовок, их дальнейшего прессования и кольцераскатки заготовки имеют разную температуру на поверхности и в середине заготовки и температура заготовки уже не может быть задана одним показателем (табл. 4).

Таблица 4. Температуры нагрева и окончания интенсивного пластического деформирования

Марка стали	Максимальная температура нагрева заготовки, °С	Минимальная температура окончания пластического деформирования, °С
40, 45	1250	750
50, 55	1240	800
40X, 40XH	1250	800
09Г2С	1250	800
20ХН3А	1220	850
20Х2Н4А	1200	860
40ХМФА, 42CrMo	1240	860

На рис. 3 приведены результаты моделирования прессования с распределением температур по сечению заготовки с применением программного обеспечения DEFORM.

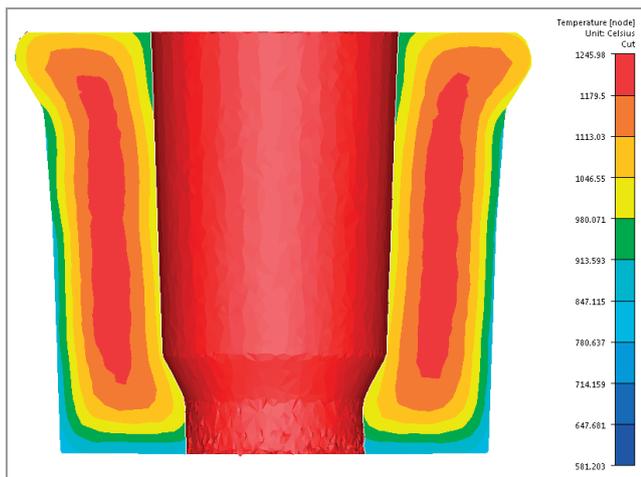


Рис. 3. Результаты моделирования операции прессования с распределением температур по сечению заготовки

ной линии базируются на контроле температуры на поверхности заготовки. Но эта температура не дает объективную оценку температурного состояния всей заготовки. Требуется введение дополнительных корректировок для использования контроля температуры на поверхности для оценки температурного состояния всей заготовки.

Выбор технических параметров автоматизированной линии для производства кольцевых заготовок планируемой номенклатуры проведен для заготовок массой до 600 кг и наружным диаметром до 1200 мм. Было выполнено моделирование [7] процессов нагрева, прессования и кольцераскатки с использованием программного обеспечения DEFORM. При моделировании были приняты следующие исходные предпосылки: температура нагрева заготовки составляет 1250 °C; время перемещения из печи к прессу – не более 30 с; цикловое время прессования на 3-позиционном прессе – в пределах 180 с; время перемещения от пресса к кольцераскаточному стану – не более 30 с; цикловое время кольцераскатки – в пределах 180 с. На основании моделирования [7] процессов охлаждения и кольцераскатки изделий разной массы для температурного состояния колец разной массы были установлены зависимости (рис. 4) вида

$$T = A G^B, \quad (1)$$

где T – температура, °C; G – масса, кг; A и B – коэффициенты: для температуры после пресса $A = 878,6$, $B = 0,0369$; для температуры перед кольцераскаткой $A = 793,6$, $B = 0,0496$; для температуры после кольцераскатки $A = 561,8$, $B = 0,104$.

При построении графиков рис. 4 использованы значения «условной температуры». В связи с этим следует обратить внимание на то, что если при контроле температуры используется измерение температуры на поверхности заготовки, то результаты этого измерения будут отличаться от параметра «условная температура».

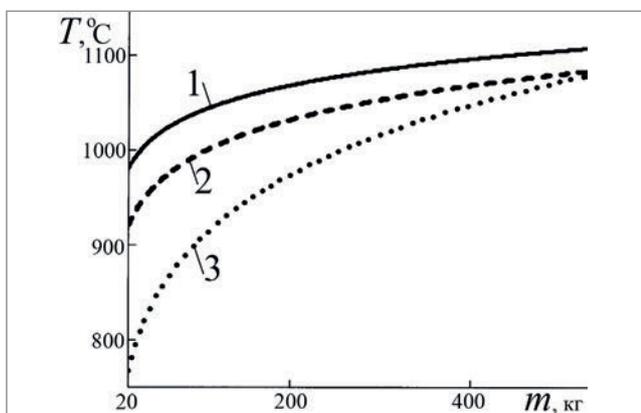


Рис. 4. Зависимость «условной температуры» T кольцевых заготовок от их массы m на разных стадиях изготовления в автоматизированной линии:
1 – после пресса; 2 – перед кольцераскаткой;
3 – после кольцераскатки. Расчет по формуле (1)

Как видно из рисунка, температура составляет от 1250 °C в середине заготовки и до 680 °C на краях. Для оценки температуры заготовки после пресса, до и после кольцераскатки одним значением предлагается оценивать температуру не на поверхности заготовки, а в глубине – там, где начинается 2-я зона от середины заготовки. При расчетах и определении понятия «температура» заготовки использован термин «условная температура», который и означает температуру на определенной глубине заготовки. В середине заготовки температура будет выше, а на поверхности – ниже «условной температуры». Уточнение понятия «температура» заготовки требует уточнения и самого метода контроля температуры заготовок после пресса, до и после кольцераскатки, так как предлагаемые средства контроля температур в автоматизированной

линии базируются на контроле температуры на поверхности заготовки. Но эта температура не дает объективную оценку температурного состояния всей заготовки. Требуется введение дополнительных корректировок для использования контроля температуры на поверхности для оценки температурного состояния всей заготовки.

Отметим, что расчет необходимости повторного нагрева (даже с использованием программного обеспечения DEFORM) не гарантирует точного результата, так как моделируемый процесс кольцераскатки может отличаться от реального. Один из факторов, которые невозможно определить при моделировании кольцераскатки и контроле «горячего» кольца, – это внутренние напряжения в кольце. Эти напряжения проявляются только при механической обработке кольца и в виде трещин после его охлаждения. Поэтому для автоматизированной кольцераскатки надо предусмотреть варианты корректировки технологического процесса.

Основные различия параметров автоматизированной линии кольцераскатки и термической обработки

В автоматизированной линии термической обработки планируется выполнение нормализации, отжига и изотермического отжига. Их ориентировочные режимы для предполагаемых к использованию марок сталей приведены в табл. 5.

Таблица 5. Режимы термической обработки в автоматизированной линии термической обработки

Марка стали	Термическая обработка	Технологическое время, ч
20, 35, 45, 55	Нормализация $HV \leq 207$	6
40X, 40XH, 18XГТ, 12ХН3А	Нормализация $HV \leq 207$	8
09Г2С	Нормализация $HV \leq 207$	10
40ХМФА, 42CrMo4	Отжиг $HV \leq 207$	14
20X2H4A, 20ХН3А	Изотермический отжиг $HV \leq 269$	52

Предполагается, что автоматизация линии термической обработки будет реализована за счет размещения кольцевых заготовок на поддонах, которые затем автоматическим манипулятором будут загружать – разгружать в печи и транспортировать к стандам окончательного охлаждения. Производительность линии термической обработки будет зависеть от количества размещаемых кольцевых заготовок на поддонах и количества печей. Из автоматизированной линии кольцераскатки готовое кольцо в охлажденном состоянии будет поступать на линию термической обработки с тактовым временем, приведенным на рис. 5 [8].

Анализ синхронности работы автоматизированной линии кольцераскатки и термической обработки выполнен на примере кольцевой заготовки из стали 40ХМФА наружным диаметром 953 мм, внутренним диаметром 806 мм, высотой 155 мм (прямоугольного сечения), массой 234 кг, годовая программа выпуска – 1589 шт. Загрузка оборудования для термической обработки находится в зависимости от работы линии кольцераскатки. Термическое оборудование будет загружаться по мере поступления заготовок колец с кольцераскатной линии. При работе линии кольцераскатки через каждые 121 с готовое и охлажденное кольцо поступит к началу линии термической обработки. Для приемки этого кольца используют поддон размером 3000 x 3000 мм, на который можно в одном ряду уложить девять колец. Предполагается, что на поддоне кольца будут уложены в два ряда, загрузка составит 18 колец с общей массой 4214 кг. При тактовом времени автоматизированной линии кольцераскатки 121 с первый поддон и первая печь для термической обработки будут загружены примерно через 37–40 мин. Если в линии будет предусмотрено восемь печей, то восьмая печь будет загружена через 5,3 ч.

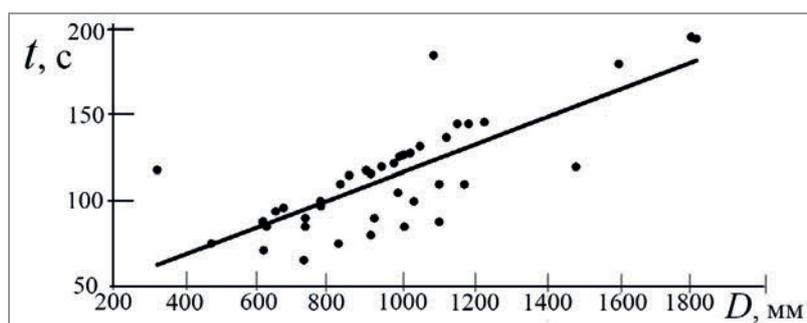


Рис. 5. Зависимость тактового времени t кольцераскатки от наружного диаметра D кольца

Для достижения твердости $HV \leq 207$ стали 40ХМФА необходим отжиг около 14 ч. За 5,3 ч на автоматизированной кольцераскатной линии будет изготовлено 144 кольца. Для оптимальной эксплуатации линии предполагается, что кольца с годовой программой не более 100 шт. изготавливают за один запуск линии; кольца с годовой программой свыше 100 до 500 шт. – за два запуска линии; кольца с годовой программой свыше 500 до 3000 шт. – за четыре запуска линии (поквартально); кольца с годовой программой свыше 3000 шт. изготавливают за 12 запусков линии (помесячно). Следовательно, для производства кольца с годовой программой 1589 шт. целесообразно за один запуск автоматизированной кольцераскатной линии изготовить 397 колец. Но линия термической обработки полностью загружена и первая печь термической обработки освободится только через 9 ч. Возникает вопрос: как дальше планировать работу автоматизированной кольцераскатной линии?

Возможны варианты: останавливать работу автоматизированной линии кольцераскатки и переводить в режим ожидания; переналаживать линию на другое наименование кольца; продолжать работу линии до полного изготовления оптимальной партии 397 шт.

Первый вариант резко повышает затраты на производство кольцевых заготовок и не может быть использован. Второй вариант также не решает проблемы синхронизации работы автоматизированных линий кольцераскатки и термообработки, так как в линии кольцераскатки переналадка с одного наименования кольца с прямоугольным сечением на другое происходит автоматически за несколько минут, а линия термообработки не готова к приему новых колец еще 9 ч. Наиболее приемлем для эффективного использования автоматизированной линии кольцераскатки третий вариант, но он требует создания промежуточного склада кольцевых заготовок после кольцераскатки, в анализируемом случае – на 250 кольцевых заготовок.

Проведенный анализ особенностей выбора массы заготовок в автоматизированных кольцераскатных комплексах, их нагрева и синхронности термической обработки изготовленных деталей позволил сделать **следующие выводы:**

1. При кольцераскатке заготовки с номинальной массой возможны случаи, когда один из параметров окончательной кольцевой детали будет находиться вне установленных допусков, а два других параметра будут в их пределах (если назначен один квалитет на все три размера детали). Для достижения точности по квалитету IT16 на все три размера кольца требуется использование заготовок массой, отличающейся от расчетной номинальной массы.

2. Возможно достижение точности по квалитету IT16 на два из трех размеров кольца (наружный или внутренний диаметры или высота), которые определяются как важнейшие исходя из конструктивных особенностей кольца и условий его последующей механической обработки и эксплуатации. Для достижения заданной точности этих параметров, максимально приближенной к номинальному значению, оператору должна быть предоставлена возможность корректировки режима кольцераскатки в процессе его отработки для конкретного кольца. На третий геометрический параметр требования по точности не должны устанавливаться.

3. Предложенная стратегия нагрева кольцевых заготовок в условиях изготовления на автоматизированной линии заключается в преимущественном использовании однократного газового нагрева заготовок в печах с вращающимся подом. Для оценки технологического температурного состояния кольцевых заготовок на различных стадиях изготовления в условиях автоматизированной линии предложено использовать «условную температуру» кольцевой заготовки, которая определяется во 2-й зоне от середины заготовки.

Моделированием процессов нагрева, прессования и кольцераскатки установлены зависимости температурного состояния колец, с использованием которых можно оценить минимально допустимую массу кольца для использования однократного нагрева с учетом минимальной температуры окончания интенсивного пластического деформирования.

4. Тактовая производительность автоматизированной линии кольцераскатки существенно превышает тактовую производительность планируемой автоматизированной линии термической обработки. Для синхронизации работы автоматизированных линий кольцераскатки и термической обработки требуется создание промежуточного склада кольцевых заготовок после автоматизированной линии кольцераскатки и разработка специального программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Антонюк, В.Е.** Кольцераскатка в условиях автоматизированного производства / В.Е. Антонюк, П.А. Пархомчик, В.В. Рудый. Мн.: Беларуская наука, 2021. 245 с.
2. **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.
3. Введен в эксплуатацию кольцераскатный комплекс Murago // Газета Минского подшипникового завода. 2017. 7 августа. № 5 (3229). С. 1–3.
4. ОАО «БЕЛАЗ» построит современный комплекс кольцераскатки в Орше. <https://m.belaz.by/press-centre/sovremennyyu-kompleks-koltseraskatki-dlya-proizvodstva-tehniki-belaz-postroyat-v-orshe/> / Date of access: 16.11.2021.
5. Ковка и штамповка: справ. / Под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 568 с.
6. **Антонюк, В.Е.** Задачи технологического обеспечения автоматизированного комплекса / В.Е. Антонюк, С.Г. Сандомирский, В.В. Рудый // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 2 (55). С. 43–54.
7. Особенности выбора массы, нагрева и термической обработки заготовок в автоматизированных кольцераскатных комплексах / В.Е. Антонюк [и др.] // Тр. 29-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2021. Беларусь»; Минск, 17–19 ноября 2021. С. 167–175.

REFERENCES

1. **Antonyuk V. E., Parhomchik P. A., Rudy V. V.** *Kol'ceraskatka v uslovijah avtomatizirovannogo proizvodstva* [Ring rolling in automated production conditions]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2021. 245 p.
2. **Kluge A., Faber H.** Glühende Ringe – Das Ringwalzen als wichtiges Verfahren der Massivumformung. *MM Industrie Magazin*, Vogel Industrie Medien GmbH & K Sonderdruck aus Heft, 2005, pp. 26–31.
3. Minsk Bearing Plant newspaper. 2017, 07.08, no. 5 (3229), pp. 1–3.
4. <https://m.belaz.by/press-centre/sovremenny-kompleks-koltseraskatki-dlya-proizvodstva-tehniki-belaz-postroyat-v-orshe>
5. **Semenov E. I.** *Kovka i shtampovka* [Forging and stamping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 568 p.
6. **Antonyuk V. E., Sandomirski S. G., Rudy V. V.** Zadachi tehnologicheskogo obespechenija avtomatizirovannogo kol'ceraskatnogo kompleksa [Tasks of technological support of the automated ring rolling complex]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 2 (55), pp. 43–54.
7. **Antonyuk V. E., Rudy V. V., Sandomirski S. G., Yavorsky V. V., Timoshenko N. P., Budzinskaya A. V.** Osobennosti vybora massy, nagreva i termicheskoy obrabotki zagotovok v avtomatizirovannyh kol'ceraskatnyh kompleksah [Features of the choice of mass, heating and heat treatment of workpieces in automated ring rolling complexes]. *Trudy 29-j Mezhdunar. nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2021. Belarus'», Minsk, 17–19 nojabrja 2021* [Proceedings of the 29th Intern. scientific and technical conference “Foundry and Metallurgy 2021. Belarus”. Minsk, November 17–19, 2021, pp. 167–175.