



УДК 621.735.34

Поступила 16.09.2021

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МАССЫ, НАГРЕВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОЛЬЦЕРАСКАТНЫХ КОМПЛЕКСАХ

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

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

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

В. В. ЯВОРСКИЙ, Н. П. ТИМОШЕНКО, А. В. БУДЗИНСКАЯ, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-Холдинг», г. Жодино, Беларусь

Рассмотрены особенности выбора массы заготовки для изготовления из нее кольцевой детали на автоматизированном кольцераскатном комплексе, особенности нагрева заготовок и термической обработки деталей в условиях автоматизированной линии. Сделан вывод о целесообразности дифференцированного назначения допусков на размеры кольца после кольцераскатки в зависимости от типа кольца и условий его последующей механической обработки и эксплуатации. Акцентировано внимание на необходимости проектирования технологии кольцераскатки с контролем массовых параметров кольцевой 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» кольцевой заготовки, которая определяется во 2-й зоне от середины заготовки.

Предложена стратегия нагрева кольцевых заготовок в условиях изготовления на автоматизированной линии, заключающаяся в использовании однократного газового нагрева заготовок в печах с вращающимся подом. Раскрыты проблемы синхронизации работы автоматизированной линии кольцераскатки и комплекса термической обработки. Показано, что тактовая производительность автоматизированной линии кольцераскатки существенно превышает тактовую производительность планируемой линии термической обработки. Сделан вывод о необходимости разработки программного обеспечения для синхронной работы автоматизированной линии кольцераскатки и комплекса термической обработки.

Предложенные рекомендации предназначены для использования при разработке 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.*

PARTICULARITIES OF THE CHOICE OF MASS, HEATING AND HEAT TREATMENT OF BLANKS IN AUTOMATED RING-ROLLING COMPLEXES

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

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

S. G. SANDOMIRSKY, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sand_work@mail.ru

V. V. JAWORSKY, N. P. TIMOSHENKO, A. V. BUDZINSKAJA, OJSC “BELAZ” – Management Company of the Holding “BELAZ-Holding”, Zhodino, Belarus

The features of the choice of the mass of the blanks for the manufacture of ring parts from it on an automated ring-rolling complex, the particularities of heating the blanks and heat treatment of ring parts in an automated line are considered. The conclusion is made about the expediency of differentiated assignment of tolerances for the ring dimensions after ring rolling, depending on the type of ring and the conditions of its subsequent machining and operation. Attention is focused on the need to design a ring rolling technology with control of the mass parameters of the ring billet not only during cutting, heating and pressing operations, but also before the ring rolling operation, especially when using reheating. To assess the technological temperature state of ring

blanks at different stages of manufacturing in an automated line, it is proposed to use the “conditional temperature” of the ring blank, which is determined in the 2-nd zone from the middle of the blank.

A strategy for heating ring blanks under manufacturing conditions on an automated line is proposed, which consists in using a single gas heating of blanks in furnaces with a revolving hearth. The problems of synchronization of the automated ring rolling line and the heat treatment complex are disclosed. It is shown that the clock performance of the automated ring rolling line significantly exceeds the clock performance of the planned heat treatment line. It is concluded that it is necessary to develop software for synchronous operation of an automated ring rolling line and a heat treatment complex.

The proposed recommendations are intended for use in the development of technological support for an automated ring-rolling complex at OJSC “PAK Plant” as part of “BELAZ-Holding”.

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

Введение

Кольцеракатка позволяет создать ответственные детали машиностроения с высокими точностью и механическими свойствами [1–5]. В мире освоена кольцеракатка деталей диаметром до 15 м, высотой до 3,5 м и массой до 30 т. В Европе работает более 30 кольцеракатных производств, но только две линии для изготовления заготовок подшипников являются автоматизированными: линия компании OVAKO (Швеция) с диаметром колец D до 1200 мм и линия на Минском подшипниковом заводе с D до 600 мм [6]. Отечественное машиностроение недостаточно использует современные технологии кольцеракатки, несмотря на то что в Беларуси изготавливается большое количество деталей, имеющих форму колец, гильз и дисков. Производство бесшовных колец с D до 3000 мм с использованием автоматизированного кольцеракатного комплекса запланировано в «БЕЛАЗ-Холдинг» на ОАО «Завод ПАК» в Орше [7].

В автоматизированной линии выполняются операции резки, нагрева, пластического деформирования на прессе и кольцеракатном стане, операции перемещения, контроля, охлаждения, маркирования [8, 9]. 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. Существенной особенностью автоматизированной кольцеракатной линии для изготовления кольцевых заготовок на Белорусском автомобильном заводе является требование управления всем технологическим процессом изготовления с использованием современного программного обеспечения без участия операторов, которым отводится роль наблюдения и вмешательства в технологический процесс изготовления лишь при необходимости. Особенностью создаваемой автоматизированной линии для термической обработки кольцевых заготовок является необходимость синхронной работы с автоматизированной линией кольцеракатки. В мировой практике кольцеракатки нет аналогов создаваемого на Белорусском автомобильном заводе автоматизированного кольцеракатного комплекса и комплекса термической обработки.

Общение с зарубежными компаниями, поставляющими кольцеракатное оборудование, показало, что их опыт эксплуатации кольцеракатного оборудования является ноу-хау этих фирм. Они не делятся этой информацией даже с заказчиками оборудования. Проведенный анализ отечественных и зарубежных источников 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.

Целью доклада является разработка и обоснование рекомендаций по преодолению ряда проблем, которые могут возникнуть при кольцеракатке в условиях автоматизированного 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

При разработке технологии кольцеракатки 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 кольцераскатке формирование наружного и внутреннего диаметра и высоты кольцевого изделия происходит пластическим деформированием кольцевой заготовки только в локальной зоне контакта заготовки с радиальными и осевыми инструментами. Второе отличие в том, что при кузнечной обработке тел вращения лишнюю массу заготовки перемещают в заранее предусмотренный облой [1]. При кольцераскатке 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 [9].

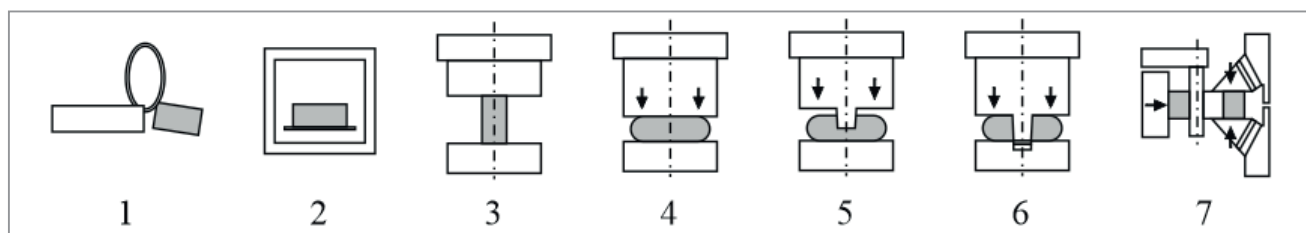


Рис. 1. Технологический процесс изготовления кольцевых заготовок:
 1 – резка заготовок; 2 – нагрев; 3 – подача на пресс; 4 – осадка;
 5 – наметка отверстия; 6 – прошивка отверстия; 7 – кольцераскатка

Достижимую точность колец в горячем состоянии можно оценить по квалитетам IT15 – IT16 ГОСТ [10]. Пока нет программ управления кольцераскаткой, которые автоматически устраняют возможные погрешности кольца. Для их устранения необходимо участие оператора.

В процессе изготовления кольцевой заготовки происходит непрерывное изменение геометрических размеров и массы кольца. Масса окалины составляет от 1,1 до 2% от массы заготовки, допуск на массу заготовки после отрезки может достигать 0,2%, масса выдры также не постоянная величина [7]. Поэтому к операции кольцераскатки масса заготовки может отличаться от расчетной до 0,5%. В докладе методика расчета массы заготовки рассмотрена на примере окончательной кольцевой заготовки с прямоугольным профилем сечения (рис. 2).

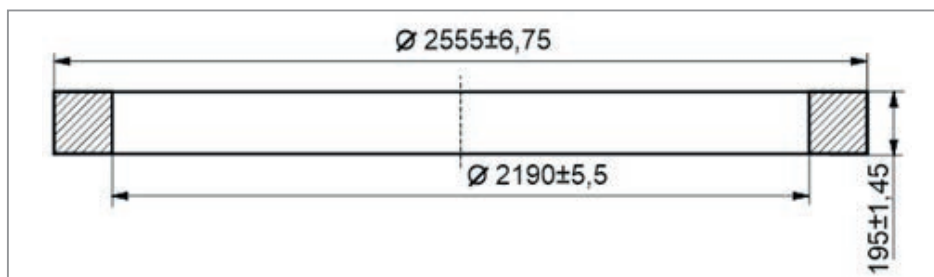


Рис. 2. Эскиз окончательной кольцевой заготовки с прямоугольным сечением

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.

Таблица 1. Расчетные массы при допустимых размерах окончательной кольцевой заготовки

| Геометрические параметры окончательной кольцевой заготовки, мм | | | Масса окончательной кольцевой заготовки, кг | Примечание |
|--|------------------------|--------------------|---|--|
| внешний диаметр D | внутренний диаметр d | высота h | | |
| D ном: 2555,00 | d ном: 2190,00 | h ном: 195,00 | 2082,20 | Номинальная масса окончательной кольцевой заготовки |
| D min: 2548,25 | d max: 2195,5 | h min: 193,55 | 1996,80 | Минимальная масса окончательной кольцевой заготовки в пределах допусков |
| D max: 2548,25 | d min: 2195,5 | h max: 193,55 | 2168,70 | Максимальная масса окончательной кольцевой заготовки в пределах допусков |

Как видно из таблицы, расчетные массы окончательной кольцевой заготовки в пределах заданных допусков по качеству IT16 отличаются от номинальной массы до 86,5 кг.

Перед разработчиками технологии кольцераскатки автоматизированной линии стоит задача: обеспечить точность по качеству 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. Расчетные параметры кольца и технологические параметры кольцераскатки заранее вводятся 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.

В докладе рассмотрены варианты кольцераскатки заготовки массой 2 082,2 кг.

По первому варианту оператор вначале выдержал в допуске минимально допустимый внутренний диаметр 2 184,5 мм и максимально допустимый наружный диаметр 2 561,75 мм. В этом случае при массе заготовки 2 082,2 кг удастся обеспечить высоту кольца 188,6 мм. Это меньше требуемой минимальной высоты 193,55 мм, т. е. из заготовки массой 2 082,2 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 2 195,5 мм и минимально допустимый наружный диаметр 2 548,25 мм. В этом случае при использовании массы заготовки 2 082,2 кг высота кольца составит 201,8 мм, что больше допускаемой максимальной высоты 196,45 мм. Получается, что из заготовки массой 2 082,2 кг 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 2 082,2 кг, при некоторых допустимых размерах по диаметрам не получается попасть в поля допусков по высоте. Возникает вопрос: с какой точностью должны быть изготовлены наружный и внутренний диаметр и высота кольца, если использована заготовка массой 2 082,2 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 в себя 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 температуры на поверхности и внутри заготовки кольца.

При нагреве заготовок под кольцераскатку должна быть обеспечена равномерная температура по поверхности и сечению заготовки, минимальное окисление, отсутствие микро -и макротрещин. Для соблюдения этих условий различают технически возможную и технически допустимую скорость нагрева. Технически возможная скорость нагрева определяется разностью температуры печи и конечной температуры поверхности заготовки. Нагрев заготовок с диаметром более 250 мм следует вести со скоростью нагрева, приведенной в табл. 3 [11].

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 |

Время общего нагрева заготовки включает время на выдержку при температуре посадки в печь, время нагрева до температурыковки и время выдержки при температурековки. Для нагрева заготовок колец средних и больших диаметров используют нагрев в газовых печах, преимущественно используются печи с вращающимся подом. Задачей системы нагрева и очистки заготовок от окалины в составе автоматизированной линии является подача заготовок к прессу с заданной температурой с расчетным тактовым временем. Заданные параметры температуры и тактового времени должны обеспечиваться системой управления при минимальном вмешательстве оператора.

Для работы автоматизированной линии желательно использование однократного нагрева. Этого позволяет добиться включение в систему ЧПУ контроля циклового времени и контроля температуры кольца на каждой операции, что снижает стоимость и затраты на эксплуатацию и упрощает обслуживание линии.

Требованиями поставки кольцераскатной автоматизированной линии для Белорусского автомобильного завода не оговорена необходимость повторного нагрева после пресса 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 автоматизированной кольцераскатной линии для Белорусского автомобильного завода является требование изготовления колец массой от 5 до 3000 кг, в то время как на наиболее автоматизированной линии OVACO диапазон изготавливаемых колец по массе 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 [11].

Таблица 4. Температуры нагрева и окончания интенсивного пластического деформирования

| Марка стали | Максимальная температура нагрева заготовки, °С | Минимальная температура окончания интенсивного 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 |

«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.

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

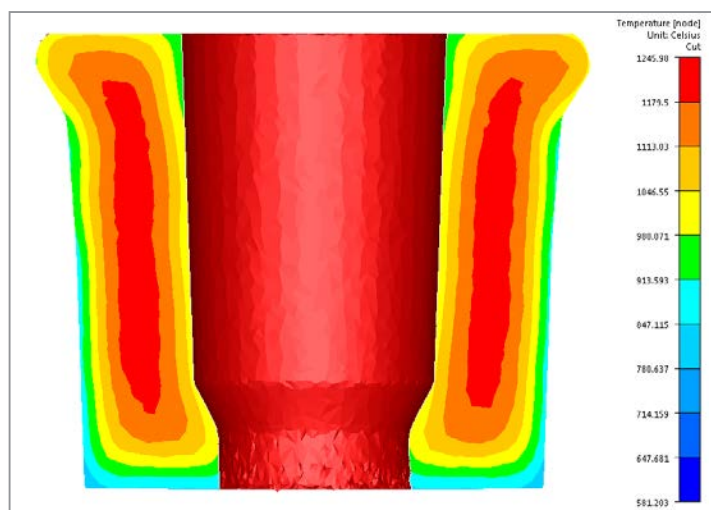


Рис. 3. Результаты моделирования операции прессования с распределением температур по сечению заготовки

Как видно из рисунка, температура составляет от 1250 °С в середине заготовки и до 680 °С на краях. Для оценки температуры заготовки после прессы, до и после кольцераскатки одним значением предлагается оценивать температуру не на поверхности заготовки, а в глубине, где начинается 2-я зона от середины заготовки.

При расчетах и определении понятия «температура» заготовки используется 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 прессы, до и после кольцераскатки, так как предлагаемые средства контроля температур для использования 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.

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 процессов нагрева, прессования и кольцераскатки с использованием программного обеспечения DEFORM. При выполнении моделирования были приняты следующие исходные предпосылки: температура нагрева заготовки – 1250 °С; время перемещения из печи к прессу – не более 30 с; цикловое время прессования на трехпозиционном прессе – в пределах 180 с; время перемещения от прессы к кольцераскаточному стану – не более 30 с; цикловое время кольцераскатки – в пределах 180 с. На основании моделирования была установлена зависимость температурного состояния колец от массы колец, приведенная на рис. 4.

Для оценки температуры 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». Для кольцевых заготовок массой до 600 кг для оценки температурного состояния на различных стадиях изготовления в автоматизированной линии можно воспользоваться зависимостями:

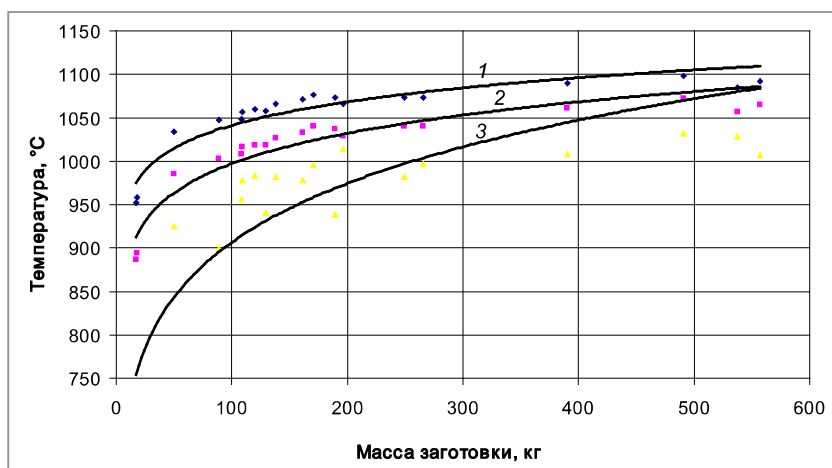


Рис. 4. «Условная температура» кольцевых заготовок на различных стадиях изготовления в автоматизированной линии:
 1 – температура после прессы; 2 – температура до кольцераскатки; 3 – температура после кольцераскатки

после прессы $T = 878,6 G^{0,0369}$; до кольцераскатки $T = 793,6 G^{0,0496}$; после кольцераскатки $T = 561,8 G^{0,104}$, где T – температура, °C; G – масса, кг.

Отметим, что выполнение расчетов по определению необходимости повторного нагрева даже с использованием программного обеспечения как DEFORM не гарантирует точного результата, так как действительный процесс кольцераскатки может отличаться от моделируемого. Внутренние напряжения в кольце – один из факторов, которые невозможно определить при моделировании процесса кольцераскатки и при контроле «горячего» кольца. Эти напряжения выявляются только при механической обработке кольца, проявляются в виде трещин после охлаждения кольца. Поэтому для автоматизированной линии кольцераскатки следует предусматривать 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. Ориентировочные режимы для принятых марок сталей приведены в табл. 5.

Таблица 5. Режимы термической обработки в автоматизированной линии термической обработки

| Марки 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 осуществлена за счет предварительного размещения кольцевых заготовок на поддонах, которые затем автоматическим манипулятором будут загружать – разгружать в печи и транспортировать к стендам 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 (рис. 5) [8].

Анализ синхронности работы автоматизированной линии кольцераскатки и линии термической обработки выполнен на примере кольцевой заготовки, параметры которой приведены в табл. 6. Загрузка оборудования для термической обработки находится в прямой зависимости от работы линии кольцераскатки и термическое оборудование будет загружаться по мере поступления заготовок колец с кольцераскатной линии.

Начинает работать кольцераскатная линия и через каждые 121 с готовое и охлажденное кольцо поступает к началу линии термической обработки. Для приемки этого кольца используют поддон размерами

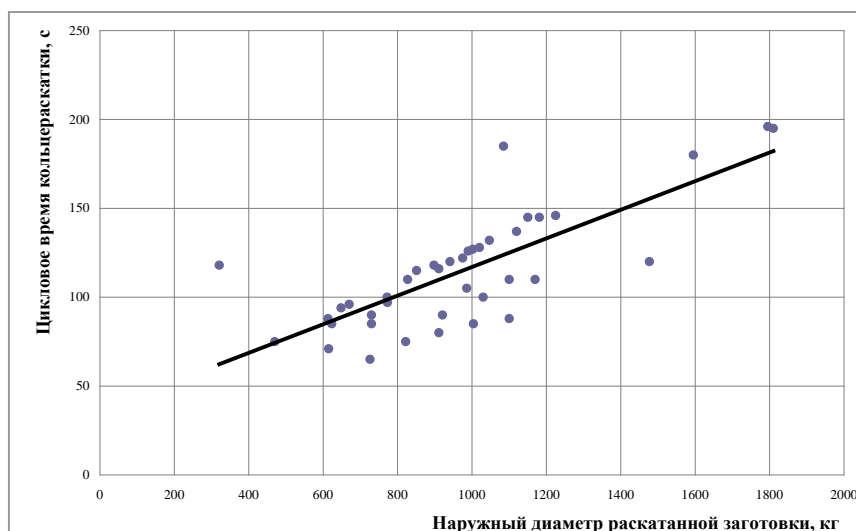


Рис. 5. Зависимость тактового времени кольцераскатки от наружного диаметра кольца

Т а б л и ц а 6. Параметры кольцевой заготовки для термической обработки

| Наружный диаметр, мм | Внутренний диаметр, мм | Высота, мм | Масса, кг | Марка стали | Годовая программа | Тип сечения |
|----------------------|------------------------|------------|-----------|-------------|-------------------|---------------|
| 953 | 806 | 155 | 234 | 40ХМФА | 1589 | Прямоугольный |

3000 x 3000 мм, на который можно в одном ряду уложить девять колец. Предполагается, что на поддоне кольца будут укладываться в два ряда, общая загрузка составит 18 колец 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.

Для принятой марки стали 40ХМФА принят отжиг с достижением твердости $HV \leq 207$, для чего требуется около 14 ч технологического времени термической обработки.

За 5,3 ч на автоматизированной кольцераскатной линии будет изготовлено 144 кольца. Для оптимальной эксплуатации автоматизированной кольцераскатной линии предполагается, что кольца с годовой программой не более 100 шт. изготавливают за один запуск кольцераскатной линии; кольца с годовой программой от 100 до 500 шт. изготавливают за два запуска кольцераскатной линии; кольца с годовой программой от 500 до 3000 шт. изготавливают за четыре запуска кольцераскатной линии (поквартально); кольца с годовой программой свыше 3000 шт. изготавливают за 12 запусков кольцераскатной линии (помесячно). Следовательно, для запущенного для производства кольца с годовой программой 1589 шт. целесообразно за один запуск автоматизированной линии изготовить 397 колец. Однако 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 автоматизированную линию кольцераскатки на другое наименование кольца; продолжать работу автоматизированной линии кольцераскатки 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 автоматизированной линии кольцераскатки и линии термической обработки, так как в автоматизированной линии кольцераскатки переналадка с одного наименования кольца на другое наименование кольца с прямоугольным сечением происходит автоматически и по времени составляет несколько минут, в то время как линия термической обработки не будет готова к приему новых колец еще 9 ч. Наиболее приемлем для эффективного использования автоматизированной линии кольцераскатки третий вариант, но он требует создания специального промежуточного склада кольцевых заготовок после кольцераскатки, в проанализированном случае примерно на 250 кольцевых заготовок.

Выводы

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

2. Возможно достижение точности по квалитету IT16 на два из трех геометрических параметров 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 параметр требования по точности не должны устанавливаться.

3. Предложена стратегия нагрева кольцевых заготовок в условиях изготовления на автоматизированной линии, заключающаяся 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 линии термической обработки. Для синхронизации работы автоматизированной линии кольцераскатки с автоматизированным комплексом термической обработки требуется создание промежуточного склада кольцевых заготовок после автоматизированной линии кольцераскатки. Для планирования синхронной работы автоматизированной линии кольцераскатки с автоматизированным комплексом термической обработки требуется разработка специального программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 18970-84. Обработка металлов давлением. Операцииковки и штамповки. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1985. 52 с.
2. **Marczinski, H.** Der Entwicklungsstand neuzeitlicher Ringwalzwerke / H. Marczinski // Stahl und. Eisen 94. 1974. No 24. S. 1207–1211.
3. **Werner, W.** Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften / W. Werner, S. Volkmar // Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt. 2000. 5 s.
4. **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.
5. **Антонюк, В. Е.** Кольцераскатка в производстве деталей машиностроения / В. Е. Антонюк [и др.] Мн.: Беларуская навука, 2013. 188 с.
6. Введен в эксплуатацию кольцераскатный комплекс Murago // Газета Минского подшипникового завода. 2017. 7 августа. № 5 (3229). С. 1–3.
7. ОАО «БЕЛАЗ» построит современный комплекс кольцераскатки в Орше. <https://m.belaz.by/press-centre/sovremennyu-kompleks-koltseraskatki-dlya-proizvodstva-tehniki-belaz-postroyat-v-orshe> / Date of access: 16.09.2021.
8. **Антонюк, В. Е.** Кольцераскатка в условиях автоматизированного производства / В. Е. Антонюк, П. А. Пархомчик, В. В. Рудый. Мн.: Беларуская навука, 2021. 245 с.
9. **Антонюк, В. Е.** Задачи технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 2 (55). С. 43–54.
10. ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. М.: Изд-во стандартов, 2019. 41 с.
11. Ковка и штамповка: справ. / Под ред. Е. И. Семенова. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. М.: Машиностроение, 1985. 568 с.