

ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.81

В.Е. АНТОНЮК, д-р техн. наук
главный научный сотрудник¹
E-mail: vladi@tut.by

С.Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук, доц.
заведующий лабораторией металлургии в машиностроении¹
E-mail: sand@iaph.bas-net.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 19.06.2020.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ МАЛОЖЕСТКИХ КОЛЕЦ ПОСЛЕ КОЛЬЦЕРАСКАТКИ

Описаны физические основы и преимущества производства изделий кольцераскаткой. Проведен анализ объемов производства изделий кольцераскаткой в Европе. Дано определение маложестких колец. Рассмотрены проблемы использования кольцераскатки для их производства, основные погрешности и деформации, возникающие в процессе изготовления маложестких колец. Проанализированы пути повышения геометрической точности колец и снятия остаточных напряжений. Объяснено принципиальное преимущество метода динамической стабилизации маложестких колец перед остальными видами правки. Представлено краткое описание устройства экспандеров для правки маложестких колец с клиновым механизмом. Охарактеризованы проблемы правки с их использованием. В качестве принципиально новой технологической операции, повышающей точность изготовления маложестких колец и снижающей остаточные напряжения в них, предложена эффективная технология динамической стабилизации — циклическое нагружение. Обоснована перспективность использования метода циклического нагружения для повышения геометрической точности и снижения остаточных напряжений в маложестких кольцах. Даны рекомендации по созданию универсальных установок для динамической стабилизации маложестких колец с целью устранения возникших в процессе производства деформаций и снятия остаточных напряжений после изготовления колец на кольцераскатных комплексах. Приведены расчетные зависимости для проектирования установок для динамической стабилизации колец с наружными диаметрами до 3000 мм и массой до 1000 кг. Результаты могут быть использованы для повышения точности изготовления маложестких кольцевых заготовок при их планируемом производстве на Белорусском автомобильном заводе и других предприятиях.

Ключевые слова: кольцо, кольцераскатка, жесткость, остаточные напряжения, циклическое нагружение, динамическая стабилизация

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-34-41>

Введение. Кольцераскатку широко используют в автомобилестроении, авиационной, космической и химической промышленности [1]. В основе процесса кольцераскатки лежит пластическое деформирование материалов, и при разработке технологий кольцераскатки используют его основные положения [2–7]. Кроме возможности изготовления деталей сложной формы, пласти-

ческое деформирование позволяет создавать ответственные детали машиностроения с высокими точностью и механическими свойствами.

Анализ зарубежных источников научно-технической информации показал, что современный объем производства заготовок бесшовных колец достигает 16 % от общего объема производства кузнечных заготовок. Только в Германии выпускается свыше

2 млн тонн заготовок колец с использованием кольцераскатки [8]. На рисунке 1 представлена структура использования технологии кольцераскатки в разных областях производства Германии [8]. Анализ диаграммы рисунка 1 показывает, что использование кольцераскатки в первую очередь связано с производством железнодорожных колес и колесных дисков для скоростных поездов, локомотивов, железнодорожных вагонов, трамваев и поездов метро [9].

Применение систем с числовым программным управлением (ЧПУ) ускорило создание принципиально новых кольцераскатных машин [10]. Проведенные исследования процесса кольцераскатки послужили созданию и развитию систем управления на основе современной компьютерной техники [11–15].

Согласно предложенной классификации маложесткими кольцами следует считать кольца с наружными диаметрами свыше 1000 мм, отношением внутреннего диаметра к наружному в пределах $d/D = 0,84...0,90$ и отношением высоты кольца к наружному диаметру в пределах $h/D = 0,03...0,12$ [16]. Маложесткие кольца, произведенные методом кольцераскатки, широко используют в автомобилестроении (см. рисунок 1), авиационной и химической промышленности, при изготовлении крупногабаритных подшипников, дисков турбин, колец ветровых установок, специальных зубчатых колес в аэрокосмической промышленности для изготовления турбинных двигателей и элементов ракет из высокопрочных материалов [17]. Производство маложестких деталей является приоритетным и актуальным направлением и для отечественного машиностроения. Оно позволит гарантировать высокие механические свойства ответственных изделий кольцевой формы (за счет отсутствия швов) и существенно снижать их материалоемкость. Их изготовление требует современных технологий, обеспечивающих стабильность геометрических параметров при изготовлении и их сохранность при эксплуатации. Это определяет высокую практическую значимость научных исследований, проводимых в рамках тематики.

Основной технологией изготовления маложестких колец является кольцераскатка в горячем состоянии, общепринятая схема которой представлена



Рисунок 1 — Структура использования кольцераскатки в отраслях машиностроения Германии
Figure 1 — Structure of ring-rolling usage in German engineering industries

на рисунке 2 [1]. Процесс кольцераскатки начинается при температуре около 1250 °С и заканчивается при температуре около 900 °С. При реализации приведенной на рисунке 2 схемы кольцераскатки в горячем состоянии возникает специфическая геометрическая погрешность в виде овальности изготовленных маложестких колец (рисунок 3).

При охлаждении кольца происходит температурная усадка и коробление. Технология охлаждения и правки кольца при поставке кольцераскатных комплексов обычно не предусматривается и разрабатывается изготовителем для конкретных колец. В результате достижение окончательной точности колец зависит от ряда факторов и может различаться при изготовлении одних и тех же видов колец для разных производств. Кроме того, при механической и термической обработке деталей возникают остаточные напряжения, изменяющие геометрические размеры и форму изделий при изготовлении и последующей эксплуатации. Эта проблема часто проявляется при изготовлении дисков, валов, труб и маложестких колец. Общее решение задачи стабилизации геометрических параметров и одновременного

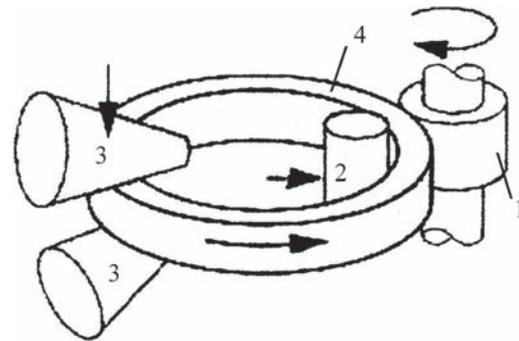


Рисунок 2 — Схема горячей кольцераскатки: 1 — главный валок; 2 — дорновой валок; 3 — осевые валки; 4 — кольцо
Figure 2 — Scheme of hot ring-rolling: 1 — main roll; 2 — mandrel; 3 — axial rolls; 4 — ring

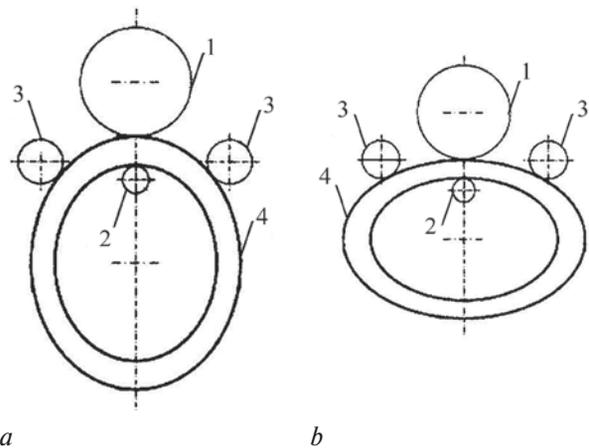


Рисунок 3 — Особенности деформирования маложестких колец в процессе кольцераскатки: *a, b* — варианты возникающей овальности кольца; 1–4 — по рисунку 2
Figure 3 — Features of deformation of rings of low rigidity in the process of ring-rolling: *a, b* — variants of the resulting ovality of the ring; 1–4 — according to Figure 2

снижения остаточных напряжений в процессе изготовления таких деталей отсутствует и поиски эффективных технологических методов ее решения продолжают.

Цель статьи — обобщение результатов исследований технологий производства и правки маложестких деталей. Обоснование преимуществ использования принципиально новой технологической операции — динамической стабилизации, обеспечивающей стабильность размеров маложестких деталей при их изготовлении, хранении и эксплуатации и снижающей остаточные напряжения в них. Получение расчетных параметров экспандеров с рычажно-шарнирным механизмом для проектирования установок для динамической стабилизации маложестких кольцевых заготовок при их планируемом производстве на Белорусском автомобильном заводе.

Результаты исследований в области технологий производства и правки маложестких деталей. Методы снятия остаточных напряжений термическими обработками в некоторых случаях позволяют стабилизировать геометрические размеры деталей, но всегда приводят к их деформированию и определяют конструкцию и массу заготовок. Термические методы требуют также длительного времени и значительных энергетических затрат.

Для стабилизации геометрических параметров и снижения остаточных напряжений при изготовлении маложестких деталей применяют технологические правки, которые обычно основаны на нагружении деталей статической нагрузкой. Методы статической правки позволяют улучшить геометрическую форму детали в процессе изготовления, но через некоторое время деталь вновь приобретает первоначальное искажение. Эти правки не уменьшают остаточных напряжений и поэтому не обеспечивают стабильной геометрической формы деталей не только в процессе эксплуатации, но и при обычном хранении.

Для повышения геометрической точности колец, изготовленных на кольцераскатных комплексах, используют экспандеры, имеющие кинематическую схему, основанную на применении клинового механизма с углом наклона клиньев 6° (рисунок 4) [18, 19].

Экспандер состоит из подвижных в радиальном направлении плунжеров, которые перемещаются клином от гидравлического привода. Для создания напряжений в кольце выше предела текучести σ_T в известных экспандерах используется гидропривод, создающий усилия от 5000 до 15 000 кН. Производством экспандеров с разными опциями занимаются компании в Германии [18, 19], США [20, 21] и Китае [22]. Почти все экспандеры имеют конструктивную схему нагружения кольца радиальными усилиями, при этом нагружение является статическим, в результате кольцо после правки на экспандере по мере

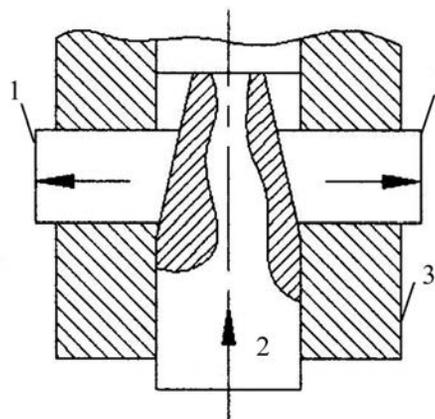


Рисунок 4 — Схема экспандера с клиновым механизмом (разрез):

1 — плунжеры; 2 — клин; 3 — корпус

Figure 4 — Diagram of an expander with a wedge mechanism (section): 1 — plungers; 2 — wedge; 3 — housing

охлаждения продолжает деформироваться за счет релаксации остаточных напряжений. При изготовлении более жестких колец из обычных сталей эти погрешности компенсируют за счет увеличения припусков (и размеров) кольцевой заготовки. Это увеличивает расход материала и стоимость заготовки, но требует меньших затрат по сравнению с использованием экспандера, и большинство изготовителей колец не используют экспандеры.

Но номенклатура и область применения маложестких колец стремительно расширяются. Применение дорогих высоколегированных сталей требует снижения припусков под последующую механическую обработку и создания технологий изготовления маложестких колец без остаточных напряжений.

Разработка рекомендаций по применению динамической стабилизации в технологии изготовления маложестких колец. Анализ мирового опыта использования циклического нагружения для снижения остаточных напряжений подтверждает перспективность этого метода. Эффективное снижение остаточных напряжений происходит в относительно узком диапазоне высоких напряжений в материале — выше предела пропорциональности, но ниже предела текучести. Поведение материалов в этой области еще недостаточно изучено, но практический опыт использования циклического нагружения подтверждает возможность снижения остаточных напряжений и стабилизацию формы и размеров нежестких деталей.

Особенностью маложестких деталей является искажение их геометрической формы в результате хранения, сборки и эксплуатации. Статические способы их правки не позволяют существенно снизить технологические остаточные напряжения, являющиеся основной причиной искажения формы маложестких деталей в процессе эксплуатации, и практически бесполезны. Для обеспечения геометрической точности и снятия остаточных напряжений в процессе изготовления маложестких деталей предложено использовать

метод динамической стабилизации [23], основанный на том, что при нагружении детали знакопеременной циклической нагрузкой происходит стабилизация геометрической формы детали относительно оси или плоскости приложения знакопеременной нагрузки и одновременное снятие остаточных напряжений. Практическое использование динамической стабилизации реализовано при изготовлении дисков сцепления и фрикционных дисков [23, 24]. Полученный опыт при изготовлении дисков позволяет расширить область использования динамической стабилизации на другие типы маложестких деталей.

Операцию динамической стабилизации предлагается использовать в качестве принципиально новой технологической операции для повышения точности и снятия остаточных напряжений в процессе изготовления маложестких колец. Особенность результата ее применения — существенное снижение остаточных напряжений и отсутствие деформирования у окончательно изготовленных деталей. Процесс динамической стабилизации принципиально отличается от других методов правки тем, что точность правки достигается независимо от величины исходной погрешности. Поэтому предварительные измерения размеров деталей (как это делается для большинства известных правок) не нужны. Это позволяет использовать динамическую стабилизацию для автоматизации правки.

Методика выбора режима динамической стабилизации. Научная основа динамической стабилизации базируется на процессах, происходящих в области малоциклового усталостной прочности, и использует установленные зависимости для описания поведения петли механического гистерезиса в области циклового упругопластического деформирования. Научно обоснован процесс стабилизации геометрической оси или плоскости детали при ее нагружении знакопеременной циклической нагрузкой по определенному закону (циклограмме) при целенаправленном управлении шириной петли механического гистерезиса [23]. Разработана методика выбора режима динамической стабилизации с использованием стандартных прочностных характеристик материалов. Определены параметры технологических циклограмм нагружения и схемы установок для динамической стабилизации маложестких деталей [23]. Это создает предпосылки для все более широкого применения такого вида правки.

Одним из показателей прочности металла является предел текучести σ_T — напряжение, отвечающее «площадке текучести» на кривой растяжения [25]. В качестве схемы нагружения маложестких колец при динамической стабилизации предлагается схема нагружения внутреннего диаметра кольца радиальными усилиями до начала возникновения в материале кольца напряжений σ на уровне предела текучести σ_T и возникновения петли механи-

ческого гистерезиса. Циклограмма нагружения, согласно которой должны меняться растягивающие напряжения в кольце, представлена на рисунке 5.

Циклограмма динамической стабилизации должна состоять из трех участков. На участке *A* (см. рисунок 5) происходит рост нагрузки до начала возникновения в материале кольца напряжений на уровне предела текучести и возникновения петли гистерезиса. На участке *B* стабилизируется ширина петли гистерезиса. На участке *C* петля механического гистерезиса закрывается. На всех трех участках нагружение должно быть циклическим с достижением расчетного суммарного уровня нагружения. Следует отметить, что процесс динамической стабилизации происходит в относительно узком диапазоне высоких напряжений, но не выше предела текучести, и в относительно узком диапазоне суммарного числа циклов нагружения с учетом свойств упрочняющихся и разупрочняющихся материалов. Уровень и количество циклов нагружения для достижения оптимального повышения геометрической точности определяются суммарным числом циклов нагружения в пределах 80...120 при уровне суммарных напряжений в пределах $(0,9...0,95) \sigma_T$.

Используемая в известных экспандерах конструктивная схема (см. рисунок 4) с клиновым механизмом с углом клина 6° не целесообразна для динамической стабилизации по ряду причин:

- создаваемые усилия гидравлическим цилиндром у экспандеров для колец с диаметром до 3000 мм достигают 15 000 кН, величины хода цилиндра достигают 1000 мм, высота экспандера над полом достигает 1,5 м, а под полом — более 3 м;
- для создания усилий порядка 13 500 кН при давлении в гидросистеме не более 25 МПа требуются гидроцилиндры с диаметрами до 820 мм, для обеспечения ускоренного хода клина около 40 мм/с требуется подача масла в гидроцилиндр в пределах 1300 л/мин, при рабочей подаче клина 7,15 мм/с требуется подача масла в пределах 250 л/мин, для чего необходимо создание специальных гидравлических систем с отдельной подачей масла для ускоренного и рабочего хода;
- для возвратного перемещения клина требуется создание достаточного усилия выхода клина из

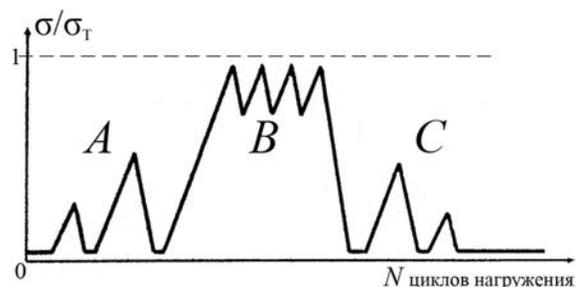


Рисунок 5 — Схема циклограммы динамической стабилизации маложестких колец
Figure 5 — Diagram of a cyclogram for dynamic stabilization of rings of low-rigidity

зацепления с плунжером, для чего нужно дополнительное время;

- все известные экспандеры используют клиновой механизм с углом клина 6° и числом плунжеров 8...9. В результате радиальное усилие на плунжерах увеличивается примерно в 4,6...4,8 раза по сравнению с усилием на центральном клине, которое создается гидравлическим цилиндром. Это соотношение остается постоянным как при холостом, так и при рабочем перемещении клина, но создаваемое максимальное радиальное усилие на всем пути перемещения клина и плунжеров не требуется. Максимальное усилие нагружения кольца необходимо только в самом конце цикла экспандирования.

В результате вся громоздкая конструкция экспандера с клиновым механизмом, с постоянным максимальным уровнем нагружения по всей длине перемещения клина не оправдана по габаритам и затратам на эксплуатацию, по экономичности и скорости экспандирования, по достигаемым результатам и затратам на их достижение.

Рычажно-шарнирные механизмы просты по конструкции, имеют высокий коэффициент полезного действия, обладают быстродействием в переключении на возвратное перемещение. Преимуществом рычажно-шарнирного механизма для использования в установке динамической стабилизации маложестких колец является переменное значение передаточного отношения между усилием на гидроцилиндре привода и усилием на плунжере. Принципиальная схема для установки динамической стабилизации маложестких колец, базирующаяся на использовании рычажно-шарнирного механизма, представлена на рисунке 6.

Использование рычажно-шарнирного механизма автоматически решает основные проблемы экспандирования:

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

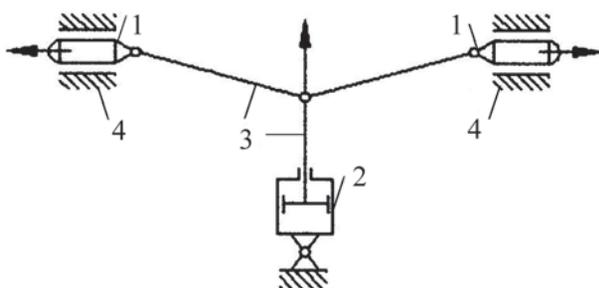


Рисунок 6 — Схема использования рычажно-шарнирного механизма: 1 — плунжеры; 2 — гидропривод;

3 — рычажно-шарнирный механизм; 4 — корпус

Figure 6 — Scheme of using the link mechanism: 1 — plungers; 2 — hydraulic drive; 3 — link mechanism; 4 — housing

нет необходимости создавать сложную систему гидропривода;

- сокращаются габариты экспандера по высоте. Это исключает необходимость создания глубоких фундаментов.

Расчетные зависимости для проектирования установок динамической стабилизации. При действии радиальных сил W в кольце возникает растягивающее усилие T (рисунок 7).

Приведем некоторые расчетные зависимости для проектирования установок динамической стабилизации маложестких колец.

Усилие разжима, действующее на один плунжер, равно:

$$W = \frac{2Q}{n} \cdot \left[\frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} - \operatorname{tg} \varphi_{2\text{нр}} \right], \quad (1)$$

где Q — усилие гидроцилиндра; α — угол наклона рычага; β — дополнительный угол, учитывающий потери на трение в шарнирах; $\varphi_{2\text{нр}}$ — угол трения плунжера; n — число плунжеров.

Для расчета возникающего в кольце растягивающего усилия T можно пользоваться зависимостью:

$$T = \frac{Q \cdot i}{2 \cdot \sin \frac{180^\circ}{n}}, \quad (2)$$

где n — число плунжеров, создающих радиальные усилия на внутреннем диаметре кольца; i — передаточное отношение от центрального привода к плунжерам.

Создаваемое в кольце напряжение растяжения равно:

$$\sigma_{\text{раст}} = \frac{T}{F}, \quad (3)$$

где F — площадь сечения кольца.

На рисунке 8 представлены графики изменения передаточного отношения рычажно-шарнирного и клинового механизмов от угла наклона ры-

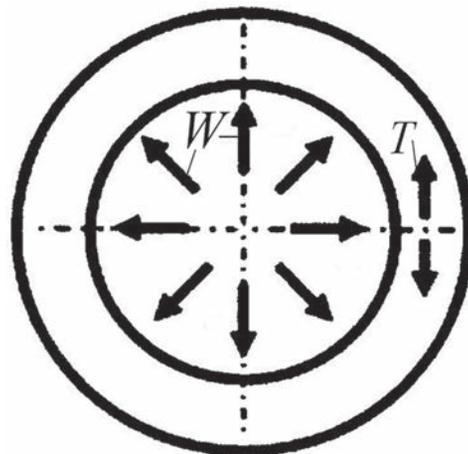


Рисунок 7 — Возникновение растягивающего усилия в кольце под действием сил разжима

Figure 7 — Occurrence of the tensile force in the ring under the action of decompression forces

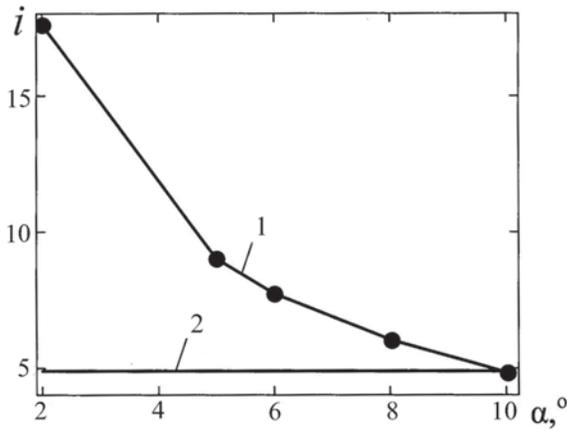


Рисунок 8 — Зависимость (1) передаточного отношения i между усилием на гидроцилиндре привода и усилием на плунжере при использовании рычажно-шарнирного механизма от угла α наклона рычага; (2) — передаточное отношение клинового механизма
 Figure 8 — Dependence (1) of the gearing ratio i between the force on the hydraulic cylinder of the drive and the force on the plunger when using the link mechanism on the tilting angle α of the link; (2) — gearing ratio of the wedge mechanism

чага. Наглядно видна разница от использования этих механизмов.

Как видно из рисунка 8, использование рычажно-шарнирного механизма позволяет увеличить усилие на плунжере в 3,5 раза по сравнению с клиновым механизмом при одних и тех же параметрах гидропривода, что создает возможности для снижения габаритов и стоимости экспандера.

На рисунке 9 представлена расчетная схема рычажно-шарнирного механизма универсальных установок для реализации динамической стабилизации маложестких колец непосредственно после изготовления на кольцераскатных комплексах. В таблице приведены расчетные параметры экспандеров с рычажно-шарнирным механизмом для

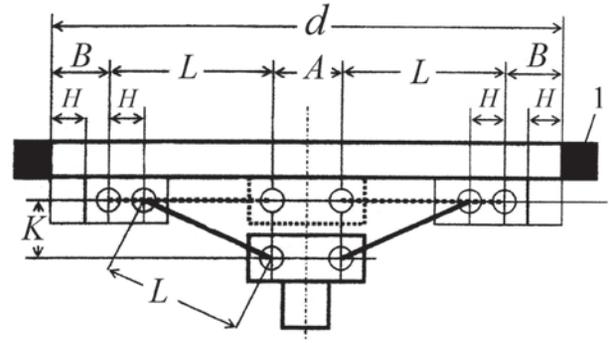


Рисунок 9 — Расчетная схема перемещений рычажно-шарнирного механизма. Определения параметров перемещений приведены в таблице (1 — экспандируемое кольцо)
 Figure 9 — Calculation scheme of movement of the link mechanism. Definitions of movement parameters are given in the Table (1 — expandable ring)

обеспечения необходимого уровня напряжений, рассчитанных с использованием формул (1)–(3), для динамической стабилизации колец номенклатуры Белорусского автомобильного завода.

Выводы. 1. В качестве принципиально новой технологической операции, повышающей точность изготовления маложестких колец и снижающей остаточные напряжения в них, предложено циклическое нагружение внутреннего диаметра кольца радиальными усилиями с суммарным числом циклов нагружения в пределах 80...120 при уровне суммарных напряжений 0,90...0,95 предела текучести материала кольца. Обоснована перспективность использования такой схемы нагружения взамен статического экспандирования.

2. Обоснованы преимущества использования кинематической схемы рычажно-шарнирного механизма по сравнению с использованием клинового механизма для реализации динамической стабилизации колец малой жесткости. Разрабо-

Таблица — Соотношения перемещений рычажно-шарнирного механизма универсальных установок (№ 1, 2, 3) для реализации динамической стабилизации маложестких колец
 Table — Ratios of movements of the link mechanism of universal installations (no. 1, 2, 3) for the implementation of dynamic stabilization of the rings of low-rigidity

Параметры	Обозначение на рисунке	Значение	№ 1	№ 2	№ 3
Минимальный внутренний диаметр кольца, мм	d	Задано	800	1000	1500
Диаметр оси шарнира, мм	d_{III}	Принято	60	80	100
Расстояние, мм	A	$1,5 d_{III}$	90	120	150
Расстояние, мм	B	$1,5 d_{III}$	90	120	150
Расстояние между осями рычага, мм	L	$0,5d - (B + 0,5A)$	265	320	525
Радиальное перемещение плунжера при повороте рычага на угол α , мм	H	$L(1 - \cos\alpha)$	—	—	—
$1 - \cos 20^\circ = (1 - 0,93969) = 0,06031$	H_{20}	$L(1 - \cos 20^\circ)$	15,98	19,30	31,66
$1 - \cos 15^\circ = (1 - 0,96592) = 0,03408$	H_{15}	$L(1 - \cos 15^\circ)$	9,03	10,90	17,89
Ход штока цилиндра при повороте рычага на угол 20° , мм	K_{20}	$L \sin 20^\circ$	90	109	179
Ход штока цилиндра при повороте рычага на угол 15° , мм	K_{15}	$L \sin 15^\circ$	68	82	135

тана конструктивная схема универсальных установок для реализации динамической стабилизации маложестких колец непосредственно после изготовления на кольцераскатных комплексах. Приведены расчетные параметры установок для динамической стабилизации маложестких колец с диаметрами 800, 1000 и 1500 мм.

Параметры будут использованы при проектировании установок динамической стабилизации колец диаметром до 3000 мм и массой до 1000 кг с целью повышения точности изготовления маложестких кольцевых заготовок при их производстве на Белорусском автомобильном заводе и других предприятиях.

Список литературы

1. Кольцераскатка в производстве деталей машиностроения / В.Е. Антонюк [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 188 с.
2. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. — М.: Машиностроение, 1977. — 424 с.
3. Теория прокатки: справ. / А.И. Целиков [и др.]; под науч. ред. В.И. Зюзина, А.В. Третьякова. — М.: Металлургия, 1982. — 335 с.
4. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справ. / П.И. Полухин, Г.Я. Гунн, А.М. Галкин. — 2-е изд. — М.: Металлургия, 1983. — 352 с.
5. Ковка и штамповка: справ. / под ред. Е.И. Семенова. — М.: Машиностроение, 1986. — Т. 2. Горячая штамповка. — 692 с.
6. Groche, P. Inkrementelle Massivumformung / P. Groche, D. Fritsche // Werkstattstechnik. — 2005. — No. 10. — Pp. 798–802.
7. Doege, E. Handbuch Umformtechnik / E. Doege, V.-A. Behrens. — Springer Verlag, 2007. — 913 p.
8. Werner, W. Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften / W. Werner, S. Volkmar // Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt. — 2000. — 5 p.
9. Technologiehandbuch Radial-Axial-Ringwalzmaschine / Thyssen Maschinenbau GmbH; Wagner Dortmund, 1990. — 105 p.
10. Marczinski, H. Der Entwicklungsstand neuerzeitlicher Ringwalzwerke / H. Marczinski // Stahl und Eisen 94. — 1974. — Vol. 94, No. 24. — Pp. 1207–1211.
11. Hülshorst, T. Erhöhung der Prozessstabilität beim Ringwalzen durch adaptive Regelung der Ringlage / T. Hülshorst. — Verlag Shaker, 2004. — 164 p.
12. Golz, J. Prozesssynchrone Simulation der Temperaturverteilung in radial-axial gewalzten Ringen mit Rechteckquerschnitt / J. Golz // Institut von Maschinenbau Universität Bochum, LPS. — 2008. — No. 4. — 204 p.
13. Kneißler, A. Multisensor-Strategie zur Optimierung des Anwalzverhaltens beim Radial-Axial-Ringwalzen / A. Kneißler. — Verlag Shaker, 2009. — 162 p.
14. Hehl, A. Thermomechanische Behandlung beim Ringwalzen / A. Hehl. — Verlag Shaker, 2010. — 229 p.
15. Hehl, A. Schnelle Modelle zur Simulation der Gefügeevolution beim Ringwalzen / A. Hehl, G. Hirt // Journal of Head Treatment and Materials. — 2010. — No. 06. — Pp. 287–298.
16. Антонюк, В.Е. Разработка классификатора колец при использовании процесса кольцераскатки / В.Е. Антонюк, В.В. Яворский // Вестн. БГТУ. Серия: Машиностроение. — 2019. — № 4. — С. 42–45.
17. Kluge, A. Glühende Ringe — Das Ringwalzen als wichtiges Verfahren der Massivumformung / A. Kluge, H. Faber // MM Industrie Magazin, Vogel Industrie Medien GmbH & K Sonderdruck aus Heft. — 2005. — Pp. 26–31.
18. Ringwalzen. Wagner Banning. — SMS Meer. — 171 p.
19. SMS Group [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.sms-meer.com/portfolio/schmiedetechnik/ringwalzen/ringexpander.html>. — Date of access: 10.06.2020.
20. Burns Machinery Inc. [Electronic resource]. — Mode of access: http://www.ringmills.com/ring_sizers.htm. — Date of access: 10.06.2020.
21. New Series of Hydraulic Ring Expanders [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.forgingmagazine.com/new-products/new-series-hydraulic-ring-expanders-0>. — Date of access: 10.06.2020.
22. KJ-22/1422X12500 TIANSHUI METALFORMING MACHINE TOOL CO [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.tsdpressbrake.com/Steel-Pipe-Ends-Expander-KJ-22-1422X12500-pd6864830.html>. — Date of access: 10.06.2020.
23. Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей / В.Е. Антонюк. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 190 с.
24. Антонюк, В.Е. Анализ однородности распределения магнитных свойств в тонкостенных дисках для прогнозирования стабильности их формы / В.Е. Антонюк, С.Г. Сандомирский // Трансформация неразрушающего контроля и технической диагностики в эпоху цифровизации. Обеспечение безопасности общества в изменяющемся мире: сб. тр. XXII Всерос. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 3–5 марта 2020 г. — М.: Спектр, 2020. — С. 141–144.
25. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учеб. для машиностроительных вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Машиностроение. 1980. — 493 с.

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

Chief Researcher¹

E-mail: vladi@tut.by

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

Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering¹

E-mail: sand@iaph.bas-net.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 19 June 2020.

DYNAMIC STABILIZATION OF RINGS OF LOW RIGIDITY AFTER THE RING-ROLLING

The physics fundamentals and advantages of ring-rolling the products are described. The analysis of production volumes of the products by ring-rolling in Europe is carried out. The definition of rings of low rigidity is given.

The problems of using of the ring-rolling for their production, the main errors and deformations arising in the process of manufacturing of rings of low rigidity are considered. The ways of increasing the geometric accuracy of the rings and relieving residual stresses are analyzed. The fundamental advantage of the method of dynamic stabilization of rings of low rigidity to other types of correction is explained. A brief description of the device expanders for dressing rings of low rigidity with a wedge mechanism is presented. The problems of correction with their use are characterized. As a fundamentally new technological operation that increases the accuracy of manufacturing of rings of low rigidity and reduces residual stresses in them, an effective technology of dynamic stabilization, cyclic loading, is proposed. The prospects of using the cyclic loading method to increase geometric accuracy and reduce residual stresses in rings of low rigidity are substantiated. Recommendations are given on the creation of universal installations for the dynamic stabilization of rings of low rigidity in order to eliminate the deformations that have arisen during the production process and relieve residual stresses after the rings are manufactured on ring-rolling complexes. The calculated dependences for the design of installations for the dynamic stabilization of rings with outer diameters up to 3,000 mm and weight up to 1,000 kg are given. The results can be used to increase the accuracy of manufacturing of rings billets of low rigidity during their planned production at the Belarusian Automobile Plant BelAZ and other enterprises.

Keywords: ring, ring-rolling, rigidity, residual stresses, cyclic loading, dynamic stabilization

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-34-41>

References

1. Antonyuk V.E., Vityaz P.A., Parkhomchik P.A., Rudy V.V. *Koltseraskatka v proizvodstve detaley mashinostroeniya* [Ring rolling in the manufacture of mechanical engineering parts]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 188 p. (in Russ.).
2. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 424 p. (in Russ.).
3. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I. *Teoriya prokatki* [Rolling theory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 335 p. (in Russ.).
4. Polukhin P.I., Gunn G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoy deformatsii metallov i splavov* [Resistance to plastic deformation of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 352 p. (in Russ.).
5. *Kovka i shtampovka. T. 2. Goryachaya shtampovka* [Forging and stamping. Vol. 2. Hot stamping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 692 p. (in Russ.).
6. Groche P., Fritsche D. Inkrementelle Massivumformung. *Werkstattstechnik*, 2005, no. 10, pp. 798–802.
7. Doege E., Behrens B.-A. *Handbuch Umformtechnik*. Springer Verlag, 2007. 913 p.
8. Werner W., Volkmar S. *Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften*. Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt, 2000. 5 p.
9. *Technologiehandbuch Radial-Axial-Ringwalzmaschine*. Thyssen Maschinenbau GmbH: Wagner Dortmund, 1990. 105 p.
10. Marczinski H. Der Entwicklungsstand neuzeitlicher Ringwalzwerke. *Stahl und Eisen*, 1974, vol. 94, no. 24, pp. 1207–1211.
11. Hülshorst T. *Erhöhung der Prozessstabilität beim Ringwalzen durch adaptive Regelung der Ringlage*. Verlag Shaker, 2004. 164 p.
12. Golz J. *Prozesssynchrone Simulation der Temperaturverteilung in radial-axial gewalzten Ringen mit Rechteckquerschnitt*. D. Sc. Thesis. Bochum, 2008. 204 p.
13. Kneißler A. *Multisensor-Strategie zur Optimierung des Anwalzverhaltens beim Radial-Axial-Ringwalzen*. Verlag Shaker, 2009. 162 p.
14. Hehl A. *Thermomechanische Behandlung beim Ringwalzen*. Verlag Shaker, 2010. 229 p.
15. Hehl A., Hirt G. Schnelle Modelle zur Simulation der Gefügeevolution beim Ringwalzen. *Journal of Head Treatment and Materials*, 2010, no. 6, pp. 287–298.
16. Antonyuk V.E., Yavorskiy V.V. Razrabotka klassifikatora kolets pri ispolzovanii protessa koltseraskatki [Development of a ring classifier using the ring rolling process]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*, 2019, no. 4, pp. 42–45 (in Russ.).
17. Kluge A., Faber H. Glühende Ringe — Das Ringwalzen als wichtiges Verfahren der Massivumformung. *MM Industrie Magazin*, 2005, pp. 26–31.
18. *Ringwalzen. Wagner Banning*. SMS Meer. 171 p.
19. *SMS Group*. Available at: <http://www.sms-meer.com/portfolio/schmiedetechnik/ringwalzen/ringexpander.html> (accessed 10 June 2020).
20. *Burns Machinery Inc*. Available at: http://www.ringmills.com/ring_sizers.htm (accessed 10 June 2020).
21. *New series of hydraulic ring extenders*. 2014. Available at: <http://www.forgingmagazine.com/new-products/new-series-hydraulic-ring-expanders-0> (accessed 10 June 2020).
22. *KJ-22/1422X12500 TIANSHUI METALFORMING MACHINE TOOL CO*. Available at: <https://www.ru.made-inchina.com/productSearch?keyword=KJ22+%2F+1422X12500+%26amp;currentPage=1> (accessed 10 June 2020).
23. Antonyuk V.E. *Dinamicheskaya stabilizatsiya v proizvodstve malozhestkikh detaley* [Dynamic stabilization in the production of parts of low rigidity]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 190 p. (in Russ.).
24. Antonyuk V.E., Sandomirski S.G. Analiz odnorodnosti raspredeleniya magnitnykh svoystv v tonkostennykh diskakh dlya prognozirovaniya stabilnosti ikh formy [Analysis of the uniformity of the distribution of magnetic properties in thin-walled disks to predict the stability of their shape]. *Transformatsiya nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoy diagnostiki v epokhu tsifrovizatsii. Obespechenie bezopasnosti obshchestva v izmenyayushchemu mire. Trudy 22 Vserossiyskoy konferentsii po nerazrushayushchemu kontrolyu i tekhnicheskoy diagnostike* [The transformation of non-destructive testing and technical diagnostics in the era of digitalization. Ensuring the security of society in a changing world. Proc. 22th All-Russian conference on non-destructive testing and technical diagnostics]. Moscow, 2020, pp. 141–144 (in Russ.).
25. Lakhtin Yu.M., Leonteva V.P. *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 493 p. (in Russ.).