

УДК 621.7

В.Е. АНТОНЮК, д-р техн. наук, доц.главный научный сотрудник лаборатории металлургии в машиностроении НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹

E-mail: vladi@tut.by

С.О. НИКИФОРОВИЧгенеральный директор²

E-mail: office@belaz.minsk.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь²ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20.01.2023.

ОСОБЕННОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК

Кольцевые заготовки востребованы в разных отраслях машиностроения при производстве крупногабаритных подшипников, дисков турбин, специальных зубчатых колес и других ответственных изделий. Кроме высоких требований к кольцевым заготовкам по точности геометрических размеров, структуре и механическим свойствам материала, в ряде случаев важнейшим требованием является их изготовление с отсутствием остаточных напряжений и высокой стабильностью геометрической формы. Специфические особенности кольцеразкатки могут приводить к возникновению остаточных напряжений, величину которых невозможно определить известными методами контроля дефектов. В статье проведен анализ причин возникновения погрешности формы и остаточных напряжений при изготовлении кольцевых заготовок в процессе кольцеразкатки и термической обработки. Дана оценка возможностей использования разных способов стабилизации формы и снижения остаточных напряжений при изготовлении кольцевых заготовок ответственных изделий машиностроения: экспандирования, термической, термомеханической, вибрационной и ультразвуковой обработок. Предложено для кольцевых заготовок, предназначенных для изготовления ответственных изделий, использовать стабилизацию формы и снижение остаточных напряжений за счет применения циклического нагружения после кольцеразкатки и термической обработки. Определена конструктивная схема и силовые параметры устройства для стабилизации кольцевых заготовок на основе использования двухрычажного рычажно-шарнирного механизма двухстороннего действия. Создаваемый на Белорусском автомобильном заводе кольцеразкатный комплекс будет иметь потенциальные возможности изготавливать кольцевые заготовки, востребованные для производства ответственных изделий в транспортном машиностроении, авиационной, космической, оборонной и химической промышленности Российской Федерации. Результаты проведенного анализа способов стабилизации формы и снижения остаточных напряжений кольцевых заготовок планируется использовать при создании этого комплекса.

Ключевые слова: кольцевая заготовка, кольцо, стабилизация, остаточные напряжения, циклическое нагружение, кольцеразкатка, термическая обработка

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-11-17>

Введение. Кольцевые заготовки востребованы в транспортном машиностроении, авиационной, космической, оборонной и химической промышленности при производстве крупногабаритных подшипников, дисков турбин, элементов ветряных установок, опорных колец, специальных зубчатых колес. Кроме высоких требований к кольцевым заготовкам по точности геометрических размеров, структуре и механическим свойствам материалов, в ряде случаев важно изготовление кольцевых заготовок без остаточных напряжений и с высокой стабильностью геоме-

трической формы. Современные процессы и машины для кольцеразкатки используют системы с числовым программным управлением (ЧПУ). Это позволило создавать принципиально новые типы кольцеразкатных машин с системами управления процессом кольцеразкатки на основе компьютерной техники [1, 2].

Изготовление кольцевых заготовок с использованием современных кольцеразкатных станков с системами ЧПУ позволяет достичь высокой точности и максимального приближения к форме окончательного изделия. Но особенности коль-

церакатки могут приводить к возникновению остаточных напряжений, величину которых невозможно определить известными методами контроля дефектов. Остаточные напряжения в процессе эксплуатации релаксируют, что приводит к деформации изделий. В связи с этим важным условием изготовления кольцевых заготовок для ответственных изделий, наряду с контролем отсутствия дефектов, являются технологические операции стабилизации и снижения до минимума остаточных напряжений в заготовке.

Целью статьи является поиск путей снижения остаточных напряжений с последующей стабилизацией геометрических параметров кольцевых заготовок, предназначенных для изготовления ответственных изделий с большой эксплуатационной надежностью.

Необходимость стабилизации кольцевых заготовок происходит от способности изделий из металлических материалов самопроизвольно изменять форму и размеры в процессе длительной эксплуатации. Самопроизвольное изменение размеров является следствием трех факторов [3]:

- нестабильности фазового и структурного состояния материала;
- релаксации остаточных внутренних напряжений, возникающих в процессе технологических операций горячей и холодной обработки, а также в процессе длительного хранения и эксплуатации;
- микроползучести под действием внешних нагрузок.

Устранение влияния этих факторов на самопроизвольное изменение форм и размеров является важным требованием к кольцевым заготовкам для изготовления ответственных изделий с высокой эксплуатационной надежностью, которые используют в авиационной, космической и оборонной промышленности.

Особенности кольцераскатки. Процесс кольцераскатки происходит в диапазоне температур от 950 до 1200 °С. Его особенностью является относительно небольшая локальная зона деформирования кольца осевыми и радиальными роликами. Вся остальная зона кольца находится в свободном состоянии и при кольцераскатке, особенно маложестких колец, может возникать существенное искажение формы кольца (рисунок 1).

Специфической особенностью кольцераскатки является образование овальности кольца (рисунок 2 а) вследствие различных условий контакта кольца с главным и дорновым валками (см. рисунок 2 б).

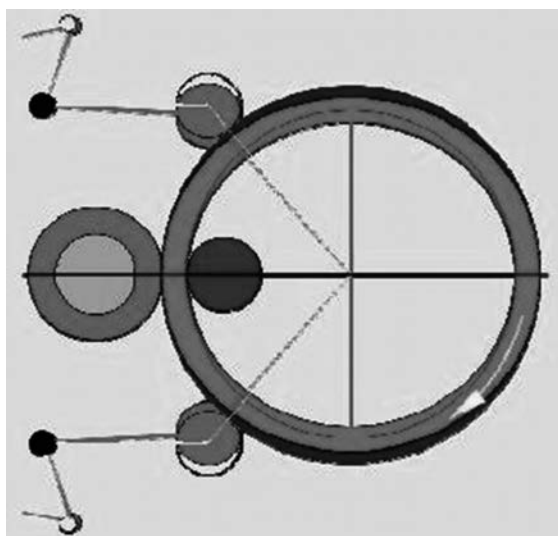
Горячее кольцо после кольцераскатки имеет геометрические параметры, отличающиеся от холодного кольца на 1,2...1,5 %. Температурное состояние кольца после кольцераскатки представлено на рисунке 3. На изображении видно, что температура на поверхности кольца около 950 °С, внутри кольца — порядка 1000 °С, а у нижнего торца — около 680 °С.

При таком перепаде температур можно прогнозировать возникновение остаточных напряже-

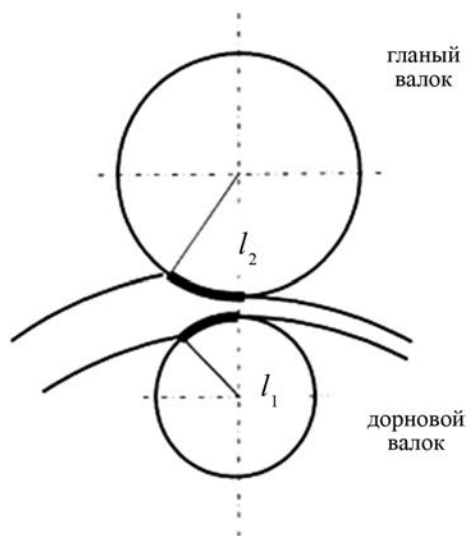


Рисунок 1 — Искажение маложесткого кольца при кольцераскатке

Figure 1 — Distortion of a low-rigid ring during ring rolling



a



b

Рисунок 2 — Образование овальности кольца при кольцераскатке: а — схема кольцераскатки; б — зоны контакта кольца в процессе кольцераскатки

Figure 2 — Formation of ring ovality during ring rolling: a — ring rolling scheme; b — ring contact zones during ring rolling

ний на горячем кольце после кольцераскатки. При дальнейшем охлаждении и температурной усадке кольца остаточные напряжения будут возрастать. В зависимости от особенностей марок сталей и условий охлаждения остаточные напряжения могут сопровождаться возникновением трещин как на поверхности, так и внутри кольцевой заготовки. Как правило, заготовки для ответственных изделий предварительно подвергают механической обработке с целью использования методов контроля поверхностных и внутренних дефектов: ультразвукового, капиллярного, магнитопорошкового. Но эти методы контроля не гарантируют стабильности геометрических и эксплуатационных параметров окончательных изделий.

Для исправления геометрических погрешностей кольцевых заготовок после кольцераскатки или термической обработки рекомендуют использовать *экспандирование*. Его основное назначение определяется как увеличение диаметра колец после кольцераскатки при температурах порядка 650...750 °С. Экспандирование относится к статическим методам правки и позволяет улучшить геометрическую форму кольца, но не уменьшает остаточных напряжений и поэтому не обеспечивает стабильной геометрической формы кольцевых заготовок. Большинство изготовителей кольцевых заготовок не использует экспандирование. Информации о достигнутых результатах по точности и стабильности форм и размеров кольцевых заготовок после экспандирования в открытых источниках не обнаружено.

Особенности термической обработки кольцевых заготовок. Для большинства кольцевых заготовок ответственных изделий термическая обработка выполняется поставщиком кольце-

вых заготовок по согласованным требованиям к структуре, твердости и геометрической точности. Вид термической обработки зависит от материала кольцевых заготовок. В некоторых случаях оговаривают требования предварительной механической обработки и видов неразрушающего контроля. Термические методы в качестве стабилизирующей обработки устраняют остаточные напряжения, но приводят к разупрочнению материала и снижению сопротивления микропластическим деформациям. Поэтому термическая обработка не всегда и не полностью решает проблему снятия остаточных напряжений и стабилизации геометрических параметров сложных и ответственных изделий. Вместе с тем термическая обработка остается основной технологической операцией снижения остаточных напряжений. Для ряда деталей ответственного назначения разрабатывают специальные технологические режимы термической обработки [4].

Основное назначение *термомеханических методов обработки* заключается в повышении прочностных характеристик и стабилизации фазового и структурного состояния деталей. Но они влияют и на улучшение геометрических параметров деталей. Одним из наиболее эффективных термомеханических методов является динамическое старение [5]. Оно представляет собой отпуск под напряжением или под нагрузкой с изменением величины напряжений. Динамическое старение осуществляют при температурах от 250 до 500 °С при выдержке от 1 до 3 ч. По уровню напряжений и количеству циклов нагружения режимы динамического старения находятся вне зоны малоциклового усталости. Отмечено повышение размерной стабильности при динамическом старении.

Ультразвуковую обработку используют вместо термической обработки при изготовлении колец подшипников. Режимы обработки для каждой конкретной детали устанавливаются экспериментально [6, 7]. По уровню напряжений и количеству циклов нагружения режимы ультразвуковой обработки находятся вне зоны малоциклового усталости.

Низкочастотную вибрационную обработку сварных соединений используют для снижения уровня остаточных напряжений в сварных конструкциях [8–10]. Вибрационная обработка происходит в зоне упругопластических деформаций. В результате достигается уменьшение напряжений первого рода на 50–60 %, второго рода — на 45 %. При первом цикле нагружения напряжения снижаются на 50–70 %, в течение последующих десяти циклов — на 25–30 %, при нагружении до 10^4 циклов — на 10–25 % [9, 10].

Целью *вибрационной правки ствол* является снижение остаточных напряжений и повышение точности по прямолинейности оси направляющей части канала. Она заключается в нагружении ство-

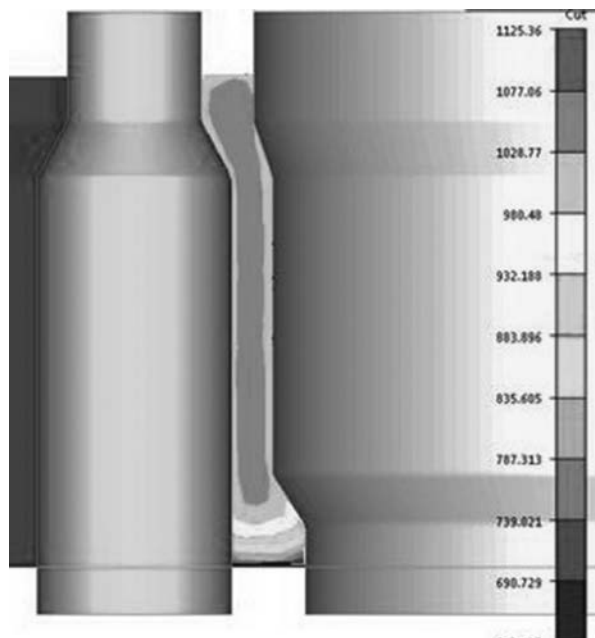


Рисунок 3 — Температурное состояние кольца после кольцераскатки

Figure 3 — Temperature state of the ring after ring rolling

ла циклической нагрузкой растяжения и закручивания. Суммарное напряжение — ниже предела пропорциональности. Количество циклов нагружения — от 900 до 1500 [11].

Компьютерное моделирование технологических процессов обработки используют для снижения остаточных напряжений при механической обработке за счет учета влияния режимов резания. В работе [12] предложено использовать математические модели, построенные на дискретных методах, и выбрать оптимальные параметры обработки по критерию минимальных остаточных деформаций детали. Математическая модель учета технологических факторов при обработке маложестких дисков и пластин при изготовлении дисков газотурбинных установок из труднообрабатываемых материалов на ММПП «Салют» (г. Москва, Российская Федерация) приведена в работе [13].

Динамическая стабилизация нашла применение при изготовлении деталей типа дисков сцепления и фрикционных дисков с достижением высокой точности и существенным снижением остаточных напряжений. Научно обосновано явление стабилизации геометрической оси или плоскости детали при ее нагружении знакопеременной циклической нагрузкой по определенному закону. Разработана методика выбора режима динамической стабилизации с использованием стандартных прочностных характеристик материалов [14].

Пути стабилизации кольцевых заготовок.

Проведенный анализ методов снижения остаточных напряжений показал, что общее решение задачи стабилизации геометрических параметров и одновременного снижения остаточных напряжений при изготовлении кольцевых заготовок отсутствует. Но можно сделать вывод о преимуществах циклических видов нагружения по сравнению со статическими для достижения лучших результатов исправления геометрических форм деталей

и воздействия на структурные и физические свойства материала.

Процесс динамической стабилизации принципиально отличается от других методов тем, что точность правки достигается независимо от величины исходной погрешности. Поэтому предварительные измерения размеров деталей, как это делается для большинства известных правок, при использовании динамической стабилизации не нужны. Это позволяет использовать динамическую стабилизацию для автоматизации правки.

На основании проведенного анализа для стабилизации кольцевых заготовок предлагается использовать основные положения динамической стабилизации. Для реализации динамической стабилизации кольцевых заготовок требуется выполнить условия:

- выбрать конструктивную схему нагружения кольцевой заготовки для создания в детали напряжений, достигающих предела текучести;
- создаваемое напряжение должно быть циклическим и изменяться по расчетной циклограмме нагружения в зависимости от исходных свойств материала кольцевой заготовки.

Разработка конструктивной схемы нагружения. Разработку конструктивной схемы нагружения кольцевой заготовки следует начинать с классификации кольцевых заготовок по типам: диск, фланец и гильза.

Для стабилизации деталей типа диск за основу могут быть приняты схемы устройств для правки дисков сцепления (рисунок 4 а) или для правки фрикционных дисков (см. рисунок 4 б). На основе этих схем создан ряд промышленных установок для правки дисков сцепления и фрикционных дисков, на которых ежегодно обрабатывалось свыше 2 млн дисков [14].

Для стабилизации деталей типа фланец за основу может быть принята схема устройства для

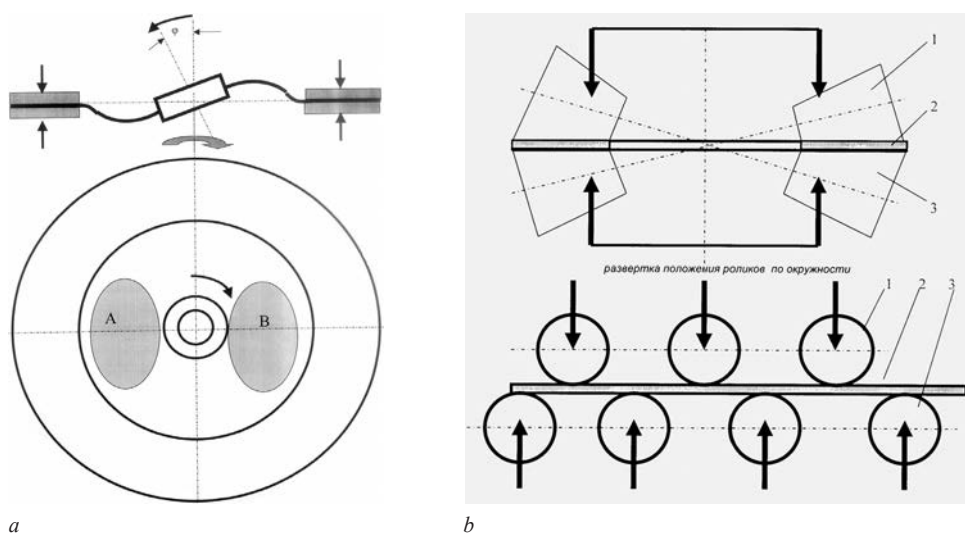


Рисунок 4 — Конструктивная схема устройства для стабилизации кольцевых заготовок типа диск:

а — для дисков сцепления; б — для фрикционных дисков

Figure 4 — Design diagram of a device for stabilizing ring blanks of the disk type: a — for clutch disks; b — for friction disks

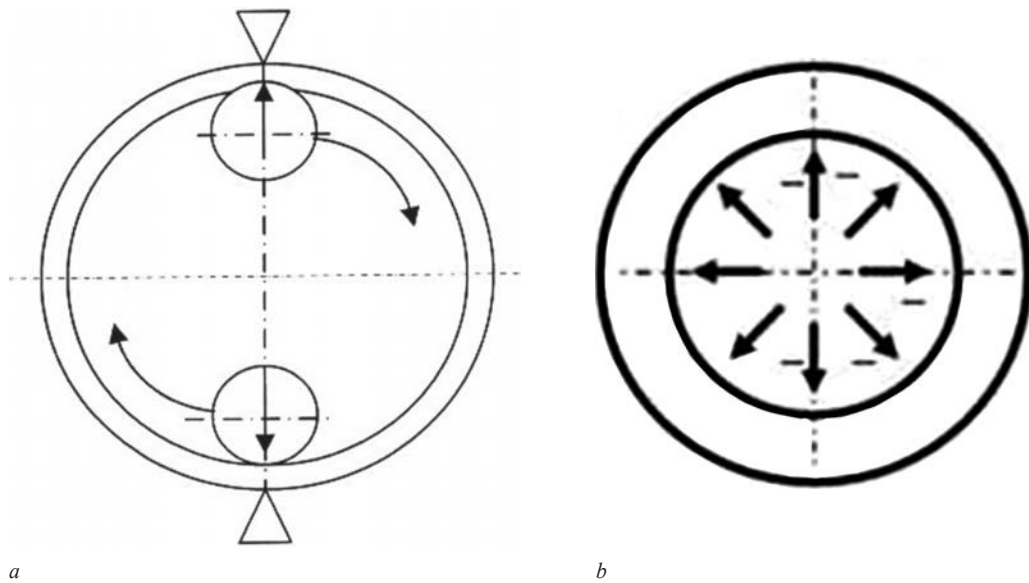


Рисунок 5 — Конструктивная схема устройства для стабилизации кольцевых заготовок типа фланец:
a — для венцов маховика; *b* — для эспандеров

Figure 5 — Design diagram of a device for stabilizing ring blanks of the flange type: *a* — for flywheel crowns; *b* — for expanders

правки венцов маховика (рисунок 5 *a*) или схема эспандера (см. рисунок 5 *b*). Для правки деталей типа гильза за основу может быть принята конструктивная схема эспандеров (см. рисунок 5 *b*).

По принятой классификации по геометрическим параметрам к кольцам типа фланец относятся кольца с соотношениями:

$$d/D = 0,70 \dots 0,80;$$

$$s/h = 0,71 \dots 1,30,$$

где d — внутренний диаметр кольца; D — наружный диаметр кольца; s — ширина сечения кольца; h — высота сечения кольца [15]. Такие заготовки из высоколегированных сталей пользуются наибольшим спросом с наибольшей ценой для изготовления ответственных деталей. Поэтому разработка конструктивной схемы устройства для стабилизации кольцевых заготовок выполнена для колец типа фланец.

Схема устройства для стабилизации кольцевой заготовки типа фланец. Для реализации принятой схемы нагружения целесообразно использовать рычажно-шарнирный механизм (рисунок 6) [16].

Преимущества рычажно-шарнирного механизма в высоком коэффициенте полезного действия, автоматическом создании максимального усилия в конце стабилизации и ускоренном перемещении плунжера в начале стабилизации. Это не требует создания систем регулирования усилий, скоростей перемещения привода плунжеров и существенно упрощает конструкцию установок.

При нагружении кольцевой заготовки ее напряженное состояние будет неравномерным по окружности. Для создания одинаковых напряжений по всему объему заготовки предусмотрено вращение заготовки относительно нагружающих

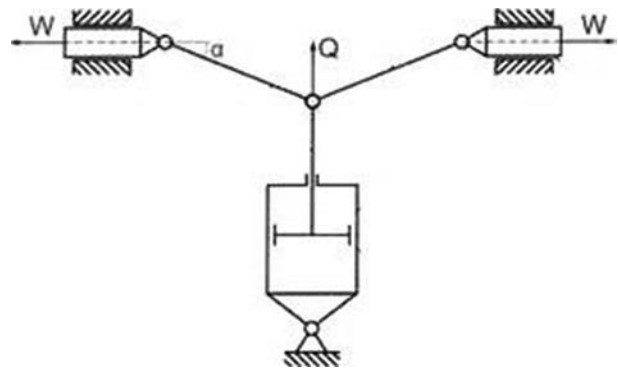


Рисунок 6 — Схема устройства с рычажно-шарнирным механизмом

Figure 6 — Diagram of a device with a lever-hinge mechanism

плунжеров. Угол поворота кольцевой заготовки должен быть не кратным углу расположения плунжеров.

Цикличность нагружения кольцевой заготовки создают возвратно-поступательным движением штока цилиндра с контролем величины вертикального перемещения штока, по которой определяют значения перемещений плунжеров и значения перемещений точки контакта кольца с плунжером. По этим параметрам определяют создаваемое напряжение в кольцевой заготовке и, в зависимости от ее материала, начальной и конечной температуры, рассчитывают циклограмму нагружения для конкретной заготовки.

Выводы. 1. На основании проведенного анализа известных способов стабилизации формы и снижения остаточных напряжений в кольцевых заготовках для ответственных изделий машиностроения предложено стабилизацию их формы и снижение остаточных напряжений проводить за счет применения циклического нагружения после кольцеразкатки и термической обработки.

2. Определена функциональная схема устройства для стабилизации кольцевых заготовок на основе использования двухрычажного рычажно-шарнирного механизма двухстороннего действия.

3. Результаты исследования способов стабилизации формы и снижения остаточных напряжений кольцевых заготовок планируются к использованию на кольцераскатном комплексе, создаваемом на Белорусском автомобильном заводе. Этот комплекс имеет потенциальные возможности изготавливать кольцевые заготовки, востребованные для производства ответственных изделий в транспортном машиностроении, авиационной, космической, оборонной и химической промышленности Российской Федерации.

Список литературы

- Hülshorst, T. Erhöhung der Prozessstabilität beim Ringwalzen durch adaptive Regelung der Ringlage / T. Hülshorst. — Verlag Shaker, 2004. — 164 p.
- Kneißler, A. Multisensor-Strategie zur Optimierung des Anwalzverhaltens beim Radial-Axial-Ringwalzen / A. Kneißler. — Verlag Shaker, 2009. — 162 p.
- Хенкин, М.Л. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении / М.Л. Хенкин, И.Х. Локшин. — М.: Машиностроение, 1974. — 256 с.
- Детали приборов высокоточные металлические. Стабилизация размеров термической обработкой. Типовые технологические процессы: ОСТ 4Г 0.054.103-74. — Взамен ОСТ 4Г 0.054.037; введ. 01.07.1976. — 1976. — 70 с.
- Пастухова, Ж.П. Динамическое старение сплавов / Ж.П. Пастухова, А.Г. Рахштадт, Ю.А. Каплун. — М.: Металлургия, 1985. — 223 с.
- Бабенко, М.Г. Совершенствование технологии обеспечения размерной точности прецизионных деталей типа колец подшипников на основе ультразвуковой стабилизации внутренних напряжений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / М.Г. Бабенко; Саратов. гос. техн. ун-т. — Саратов, 2002. — 150 с.
- Слесарев, С.В. Совершенствование технологии стабилизации остаточных напряжений в прецизионных деталях типа колец подшипников на основе применения ультразвуковой энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / С.В. Слесарев; Саратов. гос. техн. ун-т. — Саратов, 2006. — 16 с.
- Вибрационное старение / К.М. Рагульский [и др.]. — Л.: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1987. — 71 с.
- Лашенко, Г.И. Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций / Г.И. Лашенко, Ю.В. Демченко. — Киев: Экотехнология, 2008. — 168 с.
- Летуновский, А.П. Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой / А.П. Летуновский, А.А. Антонов, О.И. Степлов // Заготовительное производство в машиностроении. — 2012. — № 8. — С. 12–16.
- Крекин Л.Т. Производство автоматического оружия / Л.Т. Крекин. — Ижевск, 1998. — Часть 1. Производство стволов. — 238 с.
- Барахтенко, Е.А. Минимизация поводов тонкостенных авиационных деталей на основе дискретного моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Е.А. Барахтенко. — Иркутск, 2010. — 178 с.
- Овсенко, Е.С. Обеспечение качества изготовления маложестких деталей типа дисков газотурбинных установок за счет снижения технологических остаточных деформаций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Е.С. Овсенко. — М., 2011. — 144 с.
- Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей / В.Е. Антонюк. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 190 с.
- Антонюк, В.Е. Разработка классификатора колец при использовании процесса кольцераскатки / В.Е. Антонюк, В.В. Яворский // Вестн. БрГТУ. Машиностроение. — 2019. — № 4(117). — С. 42–45.
- Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцераскатки / В.Е. Антонюк, С.Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 3(52). — С. 34–41.

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

Chief Researcher of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: vladi@tut.by

NIKIFOROVICH Sergey O.

Director General²

E-mail: office@belaz.minsk.by

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

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

Received 20 January 2023.

FEATURES OF STABILIZATION OF RING BLANKS

Ring blanks are in demand in various branches of mechanical engineering in the production of large-sized bearings, turbine disks, special gears and other critical products. Besides high requirements to the ring blanks in terms of geometric dimensional accuracy, material structure and mechanical properties, in some cases the most important requirement is their production with absence of residual stresses and high stability of geometric shape. Specific features of ring rolling may lead to the occurrence of residual stresses, the magnitude of which is impossible to determine by the known methods of defect control. The paper analyzes the causes of shape error and residual stresses in the production of ring blanks in the process of ring rolling and heat treatment. The article also assesses the possibility of using different methods of shape stabilization and reduction of residual stresses in the manufacture of ring blanks for critical engineering products: expandable, thermal, thermomechanical, vibratory and ultrasonic treatment. For ring blanks

designed for manufacturing critical parts, it is suggested to use shape stabilization and residual stresses reduction by means of cyclic loading after ring rolling and thermal treatment. The design scheme and force parameters of a device for stabilizing ring blanks on the basis of a double-acting lever-hinge mechanism are determined. The ring-rolling complex created at the Belarusian Automobile Plant will have potential opportunities to produce ring blanks for manufacturing of critical products in transport machine-building, aviation, space, defense and chemical industries of the Russian Federation. The results of the analysis of the methods for shape stabilization and reduction of residual stresses of ring blanks are planned to be used in the creation of this complex.

Keywords: ring blank, ring, stabilization, residual stresses, cyclic loading, ring rolling, heat treatment

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-11-17>

References

- Hülshorst T. *Erhöhung der Prozessstabilität beim Ringwalzen durch adaptive Regelung der Ringlage*. Verlag Shaker, 2004. 164 p.
- Kneißler A. *Multisensor-Strategie zur Optimierung des Anwalzverhaltens beim Radial-Axial-Ringwalzen*. Verlag Shaker, 2009. 162 p.
- Khenkin M.L., Lokshin I.Kh. *Razmernaya stabilnost metallov i splavov v tochnom mashinostroenii i priborostroenii* [Dimensional stability of metals and alloys in precision engineering and instrument making]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 256 p. (in Russ.).
- OST 4G 0.054.103-74. *Detali priborov vysokotochnye metallicheskie. Stabilizatsiya razmerov termicheskoy obrabotkoy. Tipovye tekhnologicheskie protsessy* [High-precision metal parts of devices. Dimensional stabilization by heat treatment. Typical technological processes]. 1976. 74 p. (in Russ.).
- Pastukhova Zh.P., Rakhshadt A.G., Kaplun Yu.A. *Dinamicheskoe starenie splavov* [Dynamic aging of alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 223 p. (in Russ.).
- Babenko M.G. *Sovershenstvovanie tekhnologii obespecheniya razmernoy tochnosti pretsizionnykh detaley tipa kolets podshipnikov na osnove ultrazvukovoy stabilizatsii vnutrennikh napryazheniy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improving the technology for ensuring the dimensional accuracy of precision parts such as bearing rings based on ultrasonic stabilization of internal stresses. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Saratov, 2002. 147 p. (in Russ.).
- Slesarev S.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii stabilizatsii ostatochnykh napryazheniy v pretsizionnykh detalyakh tipa kolets podshipnikov na osnove primeneniya ultrazvukovoy energii*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improving the technology of stabilizing residual stresses in precision parts such as bearing rings based on the use of ultrasonic energy. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Saratov, 2006. 174 p. (in Russ.).
- Ragulskis K.M., Stulpinas B.B., Tolutis K.B. *Vibratsionnoe starenie* [Vibration aging]. Saint Petersburg, Mashinostroenie Publ., 1987. 72 p. (in Russ.).
- Lashchenko G.K., Demchenko Yu.V. *Energoberegayushchie tekhnologii poslesvarochnoy obrabotki metallokonstruktsiy* [Energy-saving technologies for post-welding processing of metal structures]. Kiev, Ekotekhnologiya Publ., 2008. 168 p. (in Russ.).
- Letunovskiy A.P., Antonov A.A., Steklov O.I. *Snyatie tekhnologicheskikh ostatochnykh napryazheniy v metallokonstruktsiyakh nizkочастотной виброобработкой* [Removal of residual stresses by low-frequency vibration treatment]. *Blanking productions in mechanical engineering*, 2012, no. 8, pp. 19–23 (in Russ.).
- Kreknin L.T. *Proizvodstvo avtomaticheskogo oruzhiya. Chast 1. Proizvodstvo stvolov* [Manufacture of automatic weapons. Part 1. Barrel production]. Izhevsk, 1998. 238 p. (in Russ.).
- Barakhtenko E.A. *Minimizatsiya povodok tonkostennykh aviatsionnykh detaley na osnove diskretnogo modelirovaniya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Minimization of the distortion of thin-walled aircraft parts based on discrete modeling. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Irkutsk, 2010. 178 p. (in Russ.).
- Ovseenko E.S. *Obespechenie kachestva izgotovleniya malozhestkikh detaley tipa diskov gazoturbinnykh ustanovok za schet snizheniya tekhnologicheskikh ostatochnykh deformatsiy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. [Ensuring the quality of manufacturing of low-rigid parts such as disks of gas turbine units by reducing technological residual deformations. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Moscow, 2011. 144 p. (in Russ.).
- Antonyuk V.E. *Dinamicheskaya stabilizatsiya v proizvodstve malozhestkikh detaley* [Dynamic stabilization in the production of low-rigid parts]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2017. 190 p. (in Russ.).
- Antonyuk V.E., Yavorskiy V.V. *Razrabotka klassifikatora kolets pri ispolzovanii protsessa koltseraskatki* [Development of a ring classifier when using the ring rolling process]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie*, 2019, no. 4(117), pp. 42–45 (in Russ.).
- Antonyuk V.E., Sandomirski S.G. *Dinamicheskaya stabilizatsiya malozhestkikh kolets posle koltseraskatki* [Dynamic stabilization of rings of low rigidity after the ring-rolling]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 3(52), pp. 34–41 (in Russ.).