



The description of ring rolling process is provided. Main advantages of the process are given in comparison with the conventional methods of producing annular parts. Main shape defects are also provided that appear at incorrect parameters as well as formulae allow to define boundaries of optimal parameters.

В. А. ТОМИЛО, В. В. ЛЕВКОВИЧ, ГНУ «Физико-технический институт» НАН Беларуси

УДК 621.7

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК

Перед современной промышленностью стоят задачи выпуска продуктов, удовлетворяющих следующим основным требованиям: снижение массы (что позволит в зависимости от выполняемых изделий функций увеличить производительность, функциональность, снизить расход топлива и т. д.); улучшение физико-механических и геометрических характеристик поверхностей (что определяет важнейшие эксплуатационные свойства, такие, как износостойкость); высокая производительность процесса производства; экономия исходного сырья и энергии.

Всем этим требованиям соответствуют процессы ОМД в общем и кольцераскатки в частности. Впервые технологическая операция раскатки была применена в Англии в 1854 г. для производства железнодорожных колес. На сегодняшний день раскатка применяется для производства бесшовных кольцевых компонентов диаметром от 75 мм до 8 м, высотой от 15 мм до 2 м и массой от 0,4 кг до 82 т. Продукты кольцераскатки варьируются от колец подшипников до корпусных деталей газотурбинных двигателей. Принципиальная схема раскатки приведена на рис. 1.

Внутренний и внешний валки формируют радиальный набор. Проведение операции возможно без осевого набора валков, в случае его присутствия он располагается противоположно радиальному набору валков.

Кольцевые детали могут производиться и другими способами, включая способы ОМД, например ковка или штамповка. В отличие от кованных и штампованных продукты раскатки производятся с более жесткими допусками и обладают лучшими механическими свойствами. Также операция раскатки характеризуется локальным приложением сил, что позволяет значительно уменьшить усилие деформирования и производить детали, которые

невозможно произвести традиционными способами из-за опасности разрушения детали или инструмента. Помимо прочего, снижение усилия позволяет снизить массу и стоимость технологического оборудования. Другие особенности, выгодно отличающие раскатку отковки: гибкость процесса (один набор валков позволяет производить обработку заготовок с широким диапазоном размеров), лучшие условия труда (отсутствие шума, вибраций), производительность (возможность производить раскатку и все предшествующие операции с одного нагрева), высокий коэффициент использования металла (получаемая форма деталей близка к конечной, при использовании холодной раскатки шероховатость поверхности может достигать $Ra = 0,08-0,32$ мкм), благоприятное расположение волокон (волокна металла после раскатки параллельны контуру и лежат по окружности, что обеспечивает высокое сопротивление образованию поверхностных трещин и упрощает механи-

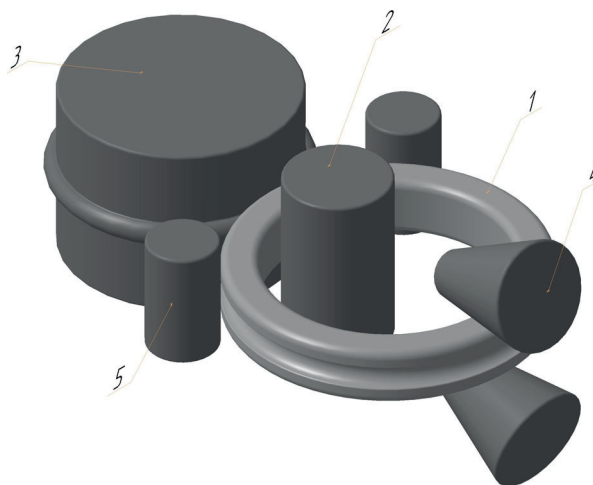


Рис. 1. Схема кольцераскатки: 1 – кольцевая заготовка; 2 – внутренний валок; 3 – внешний валок; 4 – комплект осевых валков; 5 – комплект направляющих валков

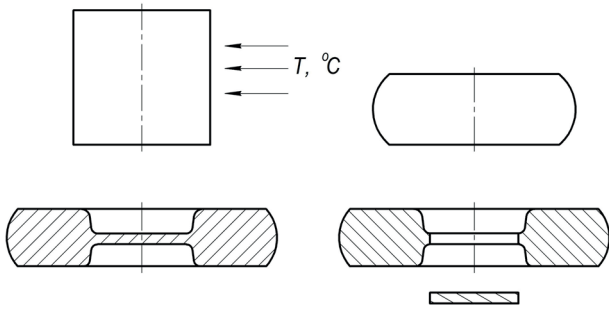


Рис. 2. Технологический процесс получения кольцевых деталей

ческую обработку, так как инструмент режет вдоль волокон, а не перпендикулярно им), наличие тангенциальных сжимающих напряжений на внешней стороне кольца, хорошая круглость получаемых деталей (что обеспечивает длительное время эксплуатации деталей). На рис. 2 показан типичный технологический процесс получения кольцевых деталей, включающий отделение от прутка мерной заготовки, нагрев, осадку, штамповку с формированием наметки под отверстие, прошивку и сам процесс раскатки.

При раскатке кольцевая заготовка зажимается между радиальными валками. К внешнему валку приложен крутящий момент и за счет сил трения он начинает вращать заготовку, которая в свою очередь также за счет сил трения начинает вращать неприводной внутренний валок. Кроме того, к внутреннему валку приложено радиальное усилие и он движется прямолинейно по направлению к внешнему валку. В результате толщина стенки кольца уменьшается, а его диаметр увеличивается. Комплект осевых валков применяется для контроля высоты заготовки. Осевые валки выполнены конусными, чтобы согласовать окружные скорости в месте контакта осевой валок – заготовка и, таким образом, уменьшить трение (скольжение) и, следовательно, снизить требуемое усилие раскатки. В процессе раскатки осевые валки движутся по направлению от центра заготовки, также верхний осевой валок имеет возможность движения вверх – вниз для регулирования обжатия в осевом направлении. Осевые валки могут применяться и для центрирования кольца.

Основная деформация при раскатке происходит в радиальном зазоре, после выхода из которого разница в деформациях создает сжимающие остаточные напряжения около поверхности и растягивающие напряжения вдоль радиуса заготовки. Также во время процесса присутствует небольшая осевая деформация, которая может привести к осевому уширению – дефекту формы. Устранить этот дефект помогает комплект осевых валков [1, 2], хотя

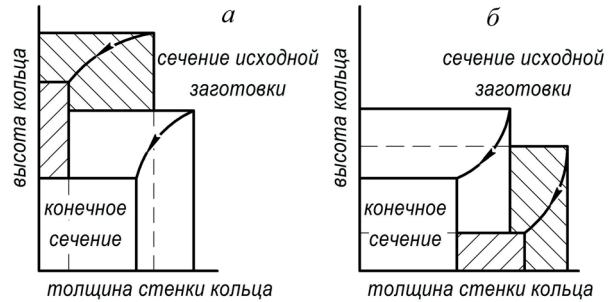


Рис. 3. Традиционные методики раскатки для колец типа «втулка» (а) и «диск» (б)

применение осевых валков также может привести к дефектам. Как отмечалось выше, осевые валки выполнены конусными, что приводит к меньшей площади контакта осевые валки – заготовка у внутренней поверхности кольца, что при условии равномерного зажатия заготовки между осевыми валками приводит к большим напряжениям и, следовательно, большим деформациям на внутренней поверхности кольца. В свою очередь деформации приводят к перегреву и повреждению микроструктуры, также возможно образование трещин. Одна из методик, позволяющих избежать трещинообразования, приведена в работе [3] (рис. 3, 4).

На рис. 3 показаны схемы стандартных методик, при которых осевое уширение, появившееся в радиальном зазоре, раскатывается в осевом зазоре и наоборот. В этом случае частота деформации выступов – два за один оборот. При таком подходе возникающая знакопеременная деформация приводит к концентрации энергии в углах кольца.

Рис. 4 поясняет предложенную методику, при которой только один зазор закрыт. В этом случае утонение стенки кольца и контроль высоты кольца происходят в разное время.

Раскатка – один из самых сложных процессов ОМД, который подвержен влиянию многих факторов (рис. 5). Попытка упорядочить все параметры оборудования и процесса на примере горячей раскатки была предпринята в работах [4–7]. Например, напряжение текучести, граничные условия

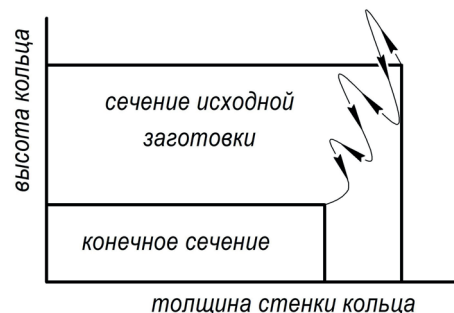


Рис. 4. Сечения исходной заготовки и продукта и кривая изменения толщины и высоты заготовки типа «диск»

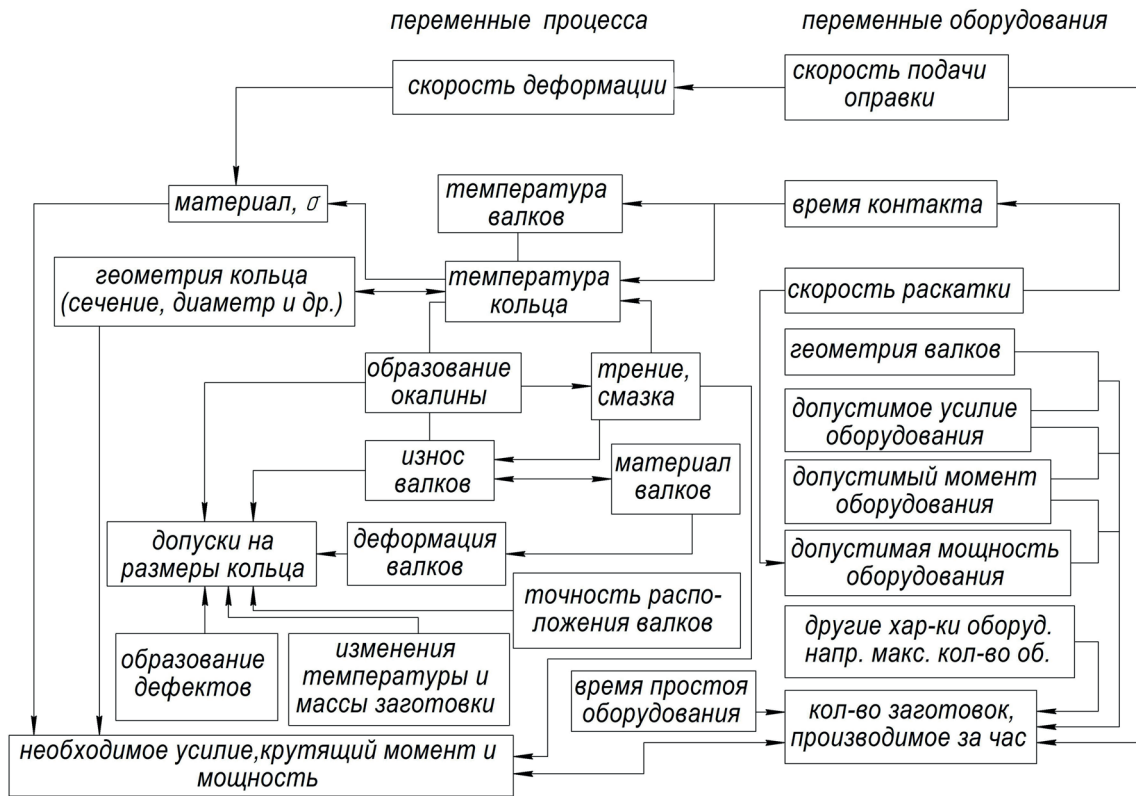


Рис. 5. Взаимосвязь параметров процесса раскатки и оборудования

(задаваемые через коэффициент трения) и геометрия кольца определяют усилие раскатки, момент и необходимую мощность.

Для повышения пластичности и снижения необходимого усилия заготовки перед раскаткой могут подвергаться нагреву. При горячей раскатке необходимо учитывать потери металла из-за обезуглероживания поверхностного слоя и образования окалины. Холодная раскатка предоставляет более высокое качество поверхности и точность размеров. В сложившейся практике чаще всего кольца раскатывают в горячем состоянии, а затем калибруют в холодном (без увеличения диаметра).

Построим механическую схему процесса раскатки (рис. 6) для колец с прямоугольным сечением, на основе которой рассчитаны предельные значения некоторых параметров.

При определении предельных значений обжатия инструмент принимается абсолютно жестким (упругая деформация отсутствует). В этом случае обжатие будет определяться подачей внутреннего валка. При слишком низком обжатии пластические зоны, сформировавшиеся на внешней и внутренней поверхностях кольца, не смогут двигаться к центру и в результате в центральной части кольца останется недеформированная область и кольцо не будет увеличиваться в диаметре. На основе этого условия рассчитано минимальное значение обжатия:

$$\Delta h \geq \Delta h_{\min} = 6,55 \cdot 10^{-3} R_1 \left(\frac{R}{R_1} - \frac{r}{R_1} \right)^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r} \right). \quad (1)$$

Максимальное значение обжатия определяется исходя из условия затягивания кольца в зазор между внешним и внутренним валками:

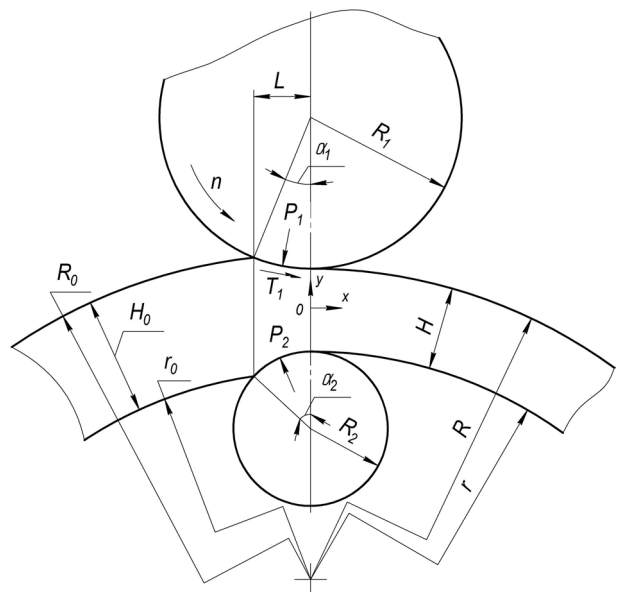


Рис. 6. Механическая модель кольцеракатки

$$\Delta h \leq \Delta h_{\max} = \frac{2\beta^2 R_1}{(1 + R_1/R_2)^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r} \right). \quad (2)$$

Используя предельные значения обжатия и исходя из условия, что проскальзывание между заготовкой и инструментом отсутствует, были найдены предельные скорости подачи внутреннего валка:

$$v_{\min} = 6,55 \cdot 10^{-3} n \frac{R_1^2}{R} \left(\frac{R}{R_1} - \frac{r}{R_1} \right)^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r} \right),$$

$$v_{\max} = \frac{2\beta^2 n R_1^2}{R(1 + R_1/R_2)^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r} \right).$$

При условии, что геометрия заготовки и коэффициент трения известны, из уравнений (1) и (2) были получены минимальные значения радиусов валков:

$$R_1 \geq R_{1\min} = \frac{R_2(R-r)}{17,5\beta R_2 - (R-r)},$$

$$R_2 \geq R_{2\min} = \frac{R_1(R-r)}{17,5\beta R_1 - (R-r)}.$$

При условии, что геометрия валков и коэффициент трения известны, для поддержания стабильности процесса необходимо, чтобы толщина стенки кольца не превышала данное значение:

$$H \leq H_{\max} = \frac{17,5\beta R_1}{1 + R_1/R_2}.$$

Основываясь на приведенных выше значениях предельных параметров, определены предельные значения увеличения диаметра заготовки:

$$\dot{D}_{\min} =$$

$$\frac{(R_0^2 - r_0^2) / \pi}{((R_0^2 - r_0^2 + H^2) / v_{R1}) + ((H^2 / \pi) / v_{f\min}^*)} - v_{f\min}^*,$$

где

$$v_{f\min}^* = 6,55 \cdot 10^{-3} \frac{v_{R1}}{\pi((R_0^2 - r_0^2) / H) + H} H^2 \times$$

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{4H}{((R_0^2 - r_0^2) / H)^2 - H^2} \right);$$

$$\dot{D}_{\max} =$$

$$\frac{(R_0^2 - r_0^2) / \pi}{2((R_0^2 - R_0 r_0) / v_{R1}) + (((R_0 - r_0)^2 / \pi) / v_{f\max}^*)} - v_{f\max}^*,$$

где

$$v_{f\max}^* = \frac{\beta^2 R_1^2 v_{R1}}{\pi R_0 (1 + R_1/R_2)^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_0} - \frac{1}{r_0} \right).$$

Для стабильного увеличения диаметра кольцевой заготовки скорость увеличения внешнего диаметра кольца должна быть постоянной, а скорость подачи внутреннего валка должна постепенно снижаться с уменьшением толщины кольцевой заготовки.

Как было указано выше, размеры получаемых деталей и инструмент могут достигать нескольких метров. Это делает экспериментальное изучение процесса кольцераскатки достаточно дорогим. В связи с этим кольцераскатка подвергалась изучению с помощью аналитических методов (метод верхней оценки и метод Хилла). В 90-х годах начало распространяться программное обеспечение для инженерных расчетов, которое позволяет проводить моделирование технологического процесса, выявлять слабые места и оптимизировать параметры. Применение данного вида программного обеспечения может существенно снизить время разработки новой технологии и сократить затраты. Сравнение результатов эксперимента и моделирования показывает, что общая ошибка геометрических размеров конечного продукта не превышает 6% [8].

Установлено, что наиболее эффективным с точки зрения производительности, металлоемкости и качества способом получения кольцевых деталей больших диаметров является штамповка с последующей раскаткой. Теоретический анализ показал, что для устойчивого процесса кольцераскатки необходимо обеспечить постоянную скорость увеличения внешнего диаметра, что достигается переменной подачей внутреннего валка, зависящей от толщины кольцевой заготовки.

Литература

1. Eruc, E. A summary of ring rolling technology-I. Recent trends in machines, processes and production lines / E. Eruc, R. Shivpuri // Int. J. Mach. of Mach. Tools and Manufact. 1992. Vol. 32. N 3. P. 379–398.
2. К о р о л е в, А. Л. А. Совершенствование технологии изготовления тонкостенных колец подшипников / Ал. А. Королев, А. В. Королев, Ан. А. Королев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004.
3. K l u g e A. Control of strain and temperature distribution in the ring rolling process / A. Kluge, Y.-H. Lee, H. Wiegels, R. Kopp // J. of Mater. Process. Technol. 1994. Vol. 45. N 1–4. P. 137–141.
4. E r u c, E. A summary of ring rolling technology-II. Recent trends in process modeling, simulation, planning and control / E. Eruc, R. Shivpuri // Int. J. Mach. of Mach. Tools and Manufact. 1992. Vol. 32. N 3. P. 399–413.
5. Lin, H. The extremum parameters in ring rolling / H. Lin, Z.-Z. Zhi // J. of Mater. Process. Technol. 1997. Vol. 69. N 1–3. P. 273–276.

6. Q i a n, D. S. Investigation of distribution of plastic zone in the process of plastic penetration / D. S. Qian, L. Hua, Z. J. Zuo // J. of Mater. Process. Technol. 2007. Vol. 187–188. N 12. P. 734–737.
7. L i n H. Planning feed speed in cold ring rolling / H. Lin [et al.] // Int. J. Mach. of Mach. Tools and Manufact. 2007. Vol. 47. N 11. P. 1695–1701.
8. G i o r l e o, L. 3D simulation of a hot ring rolling industrial process / L. Giorleo, E. Ceretti, C. Giardini // Int. J. Mater. Form. 2010. Vol. 3, Supplement 1. P. 323–326.