

УДК621.7

Совершенствование способа определения скорости подачи оправки во время раскатки

Евдокимов Данила Валериевич¹

dv_evdokimov@mail.ru

Тарасов Иван Сергеевич²

ti-28-095-k@yandex.ru

Евсюков Сергей Александрович¹

mt6evs@yandex.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», Верхняя Салда, Россия

Аннотация. Рассмотрены способы математической формализации скорости подачи оправки, представлены сильные и слабые стороны существующих подходов, а также представлен новый способ расчета скорости подачи оправки. Проведено моделирование раскатки профильного кольца из титанового сплава ВТ6 и установлена возможность использования кусочно-линейной аппроксимации скорости подачи оправки.

Ключевые слова: раскатка колец, скорость подачи оправки, метод конечных элементов, кусочно-линейная аппроксимация, титановые сплавы

Improvement of the method of determining the feed speed of the mandrel during rolling

Evdokimov Danila Valerievich¹

dv_evdokimov@mail.ru

Tarasov Ivan Sergeyevich²

ti-28-095-k@yandex.ru

Evsyukov Sergey Alexandrovich¹

mt6evs@yandex.ru

¹ BMSTU, Moscow, Russia² VSMPO-AVISMA Corporation, Verkhnyaya Salda, Russia

Abstract. The study examines methods of mathematical formalization of the mandrel feed rate, presents the strengths and weaknesses of existing approaches, and presents a new method for calculating the mandrel feed rate. Modeling of rolling of a profile ring made of titanium alloy VT6 was carried out and the possibility of using a piecewise linear approximation of the mandrel feed rate was established.

Keywords: ring rolling, mandrel feed rate, finite element method, piecewise linear approximation, titanium alloys

Введение. Раскатка колец — технологический процесс получения бесшовных колец произвольного сечения, при котором увеличивается диаметр заготовки, за счет уменьшения толщины и высоты заготовки (рис. 1). Скорость вращения главного вала, скорость подачи оправки, скорость подачи осевых валков определяют весь процесс раскатки и влияют на распределение температуры и деформации по объему, качество микроструктуры и механических свойств, заполнения профиля кольца и сохранение формы кольца [1, 2]. Поэтому

очень важно задавать корректные скорости валков, чтобы получить качественное изделие.

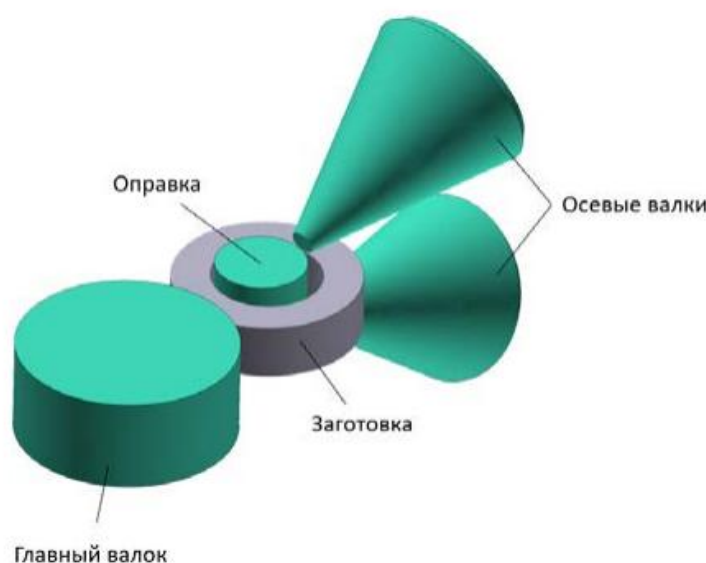
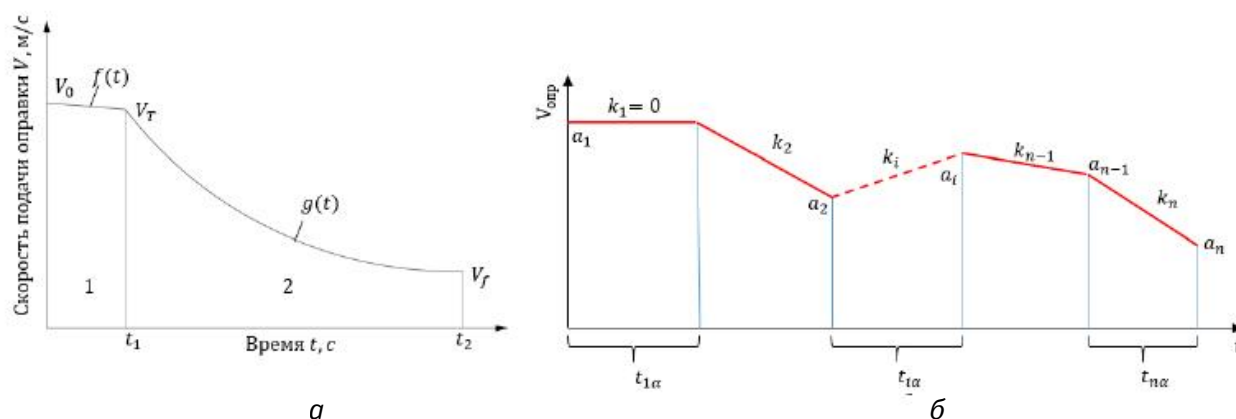


Рис. 1. Схема раскатки

Целью работы является получение кольца необходимого качества, используя подбор скорости подачи оправки. Для достижения цели выполнялись следующие задачи: анализ существующего подхода вычисления скорости подачи оправки, разработка нового способа определения скорости подачи оправки. В рамках исследования использовались метод конечных элементов для моделирования процесса раскатки в ПО QForm и метод последовательного перебора для поиска оптимальной скорости подачи оправки.

Определение кинематики процесса раскатки. Скорость подачи оправки должна постепенно убывать к концу процесса раскатки, чтобы сохранить стабильность протекания процесса при уменьшающейся толщине кольца. L. Giorleo и др. в работе предложено весь процесс раскатки разбить на две стадии (рис. 2). Первая стадия соответствует внедрению оправки в материал и переходу ко второй стадии, на которой раскатка протекает стабильно с интенсивным изменением размеров кольца [3].



а

б

Рис. 2. Формализация скорости подачи оправки:

а — квадратичный полином; б — кусочно-линейная функция

Параметризация зависимости осуществляется системой уравнений (1):

$$V(t) = \begin{cases} f(t) = a_f t^2 + b_f t + d_f, & t < t_1; \\ g(t) = a_g t^2 + b_g t + d_g, & t \geq t_1, \end{cases} \quad (1)$$

где a_f, b_f, d_f — коэффициенты функции аппроксимации на первом этапе; a_g, b_g, d_g — коэффициенты функции аппроксимации на втором этапе.

Граничные условия для скоростей V_0, V_T, V_f во многих исследованиях задаются из условий захвата и отсутствия проскальзывания между материалом заготовки, оправки и главного валка для прямоугольных колец, уравнения (2), (3) [4, 5]:

$$v_{r,min} = \frac{3,275 \times 10^{-3} n_r (R_0 - r_0)^2 (R_1 + R_2)}{\pi R_0 R_2}; \quad (2)$$

$$v_{r,max} = \frac{n_r \beta_r^2 R_1^2 R_2}{\pi R (R_1 + R_2)} \quad (3)$$

где $v_{r,min}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ — скорость подачи оправки; $v_{r,max}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ — скорость подачи оправки; $R_1, \text{мм}$ — радиус главного валка; $R_2, \text{мм}$ — радиус оправки; $R_0, \text{мм}$ — внешний радиус заготовки; $r_0, \text{мм}$ — радиус отверстия заготовки; $n_r, \text{с}^{-1}$ — частота вращения главного валка; $\beta_r = \text{tg}^{-1}(\mu)$ — угол трения между кольцом и валками.

В таком случае зависимость скорости подачи оправки фиксируется на весь процесс. Поэтому необходимо промоделировать весь процесс, чтобы определить влияние движения оправки на характеристики раскатки. Предлагается более гибкий способ формализации скорости подачи оправки в виде кусочно-линейной функцией (рис. 2).

С физической точки зрения в начале каждого оборота определяется начальное значение скорости подачи оправки с помощью коэффициента a и ускорение, соответствующее коэффициенту k . Для первого оборота кольца задается $a_1 = \text{const}$ и $k_1 = 0$, на последующих задается только ускорение оправки k_i , а значения скорости вычисляются по формуле (4) из условия непрерывности:

$$a_i = k_i (t_{i\alpha} - t_{(i-1)\alpha}) + a_{i-1}, \quad (4)$$

где $a_i, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ — скорость подачи оправки в конце оборота; $a_{i-1}, \text{мм/с}$ — скорость подачи оправки в начале оборота; $k_i, \frac{\text{мм}}{\text{с}^2}$ — ускорение оправки; $t_{i\alpha} - t_{(i-1)\alpha}, \text{с}$ — время оборота.

Результаты расчета процесса раскатки. Исследование проводилось на базе моделирования процесса раскатки двухстороннего профильного кольца с двумя наружными фланцами возле торцов кольца из титанового сплава ВТ6. Начальные размеры заготовки: внешний диаметр 1350 мм, толщина 175 мм, высота 300 мм, начальная температура 950 °С, допустимый диапазон темпе-

ратуры от 800 до 1000 °С. Раскатка осуществляется до внешнего диаметра 1600 мм, остальные размеры представлены на рис. 3. Диаметр главного валка 930 мм, диаметр оправки 300 мм. Также перед деформированием осуществляется охлаждение на воздухе длительностью 40 с.

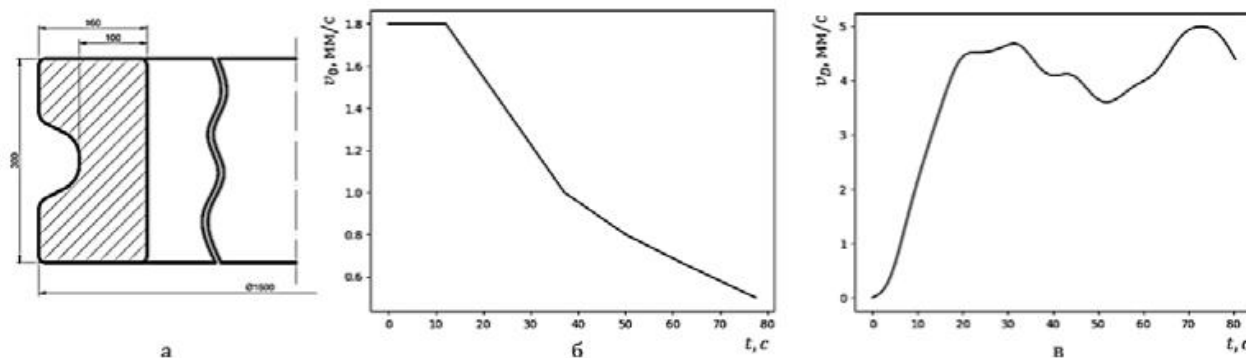


Рис. 3. а — размеры кольца; б — скорость подачи оправки v_0 ; в — скорость роста диаметра v_D

Подбор значений ускорений оправки на каждом обороте осуществлялся методом последовательного перебора коэффициента k в диапазоне от -3 до 3 из условий сохранения стабильности процесса и поддержания температуры материала в нужном диапазоне. В результате моделирования время раскатки составило 77,5 с и кольцо совершило 6 полных оборотов. В начальный момент времени скорость подачи оправки была равна 1,8 мм/с, а в конце процесса составила 0,5 мм/с (рис. 3). Скорость роста диаметра характеризуется двумя пиковыми значениями 4,5 и 5 мм/с. На самом деле на 50 с произошло полное заполнение профиля кольца, что и вызвало увеличение скорости роста диаметра и появление второго пика.

Рассмотрим основные характеристики процесса: относительное изменение площади сечения между оправкой и главным валком, распределение температуры и разброс диаметра (рис. 4).

Стандартное отклонение диаметра повторяет зависимость скорости роста диаметра. Максимальное значение не превышает 8 мм, что можно скорректировать правкой. Разброс температур оценивался с помощью 5-го и 95-го перцентиля распределения $T_{0,05}$ и $T_{0,95}$ соответственно. Таким образом 90 % всего объема гарантировано находится в необходимом температурном диапазоне. Максимальное относительное изменение площади сечения между оправкой и главным валком не превысило 6 %, что соответствует теоретическим рекомендациям в 5–10 %.

С другой стороны, во время раскатки титановых сплавов из-за растягивающих напряжений на внешней поверхности кольца, могут появляться трещины, которые зарождаются в альфированном слое и могут проникать вглубь материала, поэтому был осуществлен расчет критерия истощения ресурса пластичности Кокрофта — Латама (рис. 5). В результате моделирования было

установлено, что значение критерия не превышало 0,6 при критических значениях $C_V = 1$.

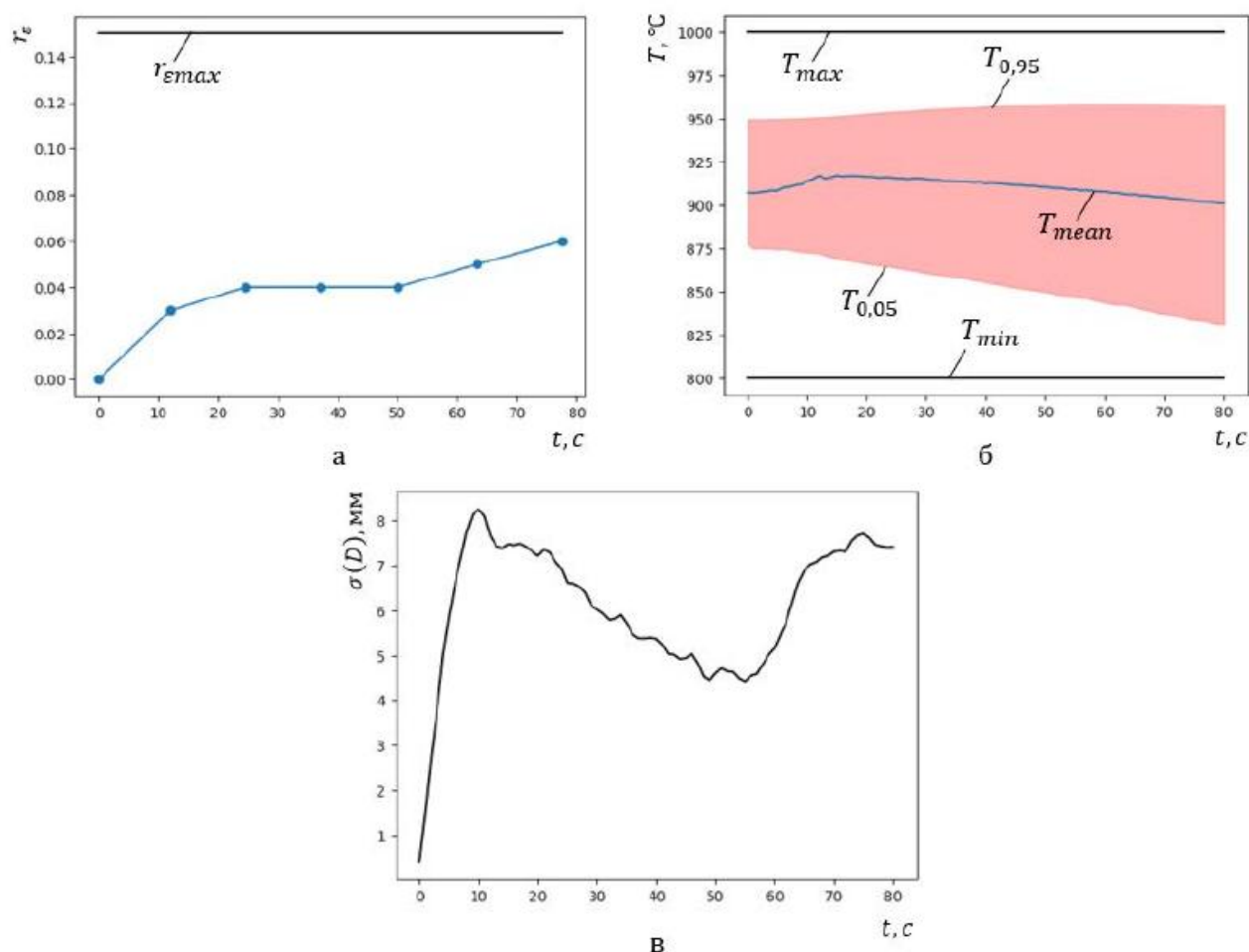


Рис. 4. а — относительное изменение площади сечения кольца r_ϵ ; б — распределение температуры T ; в — дисперсия диаметра $\sigma(D)$

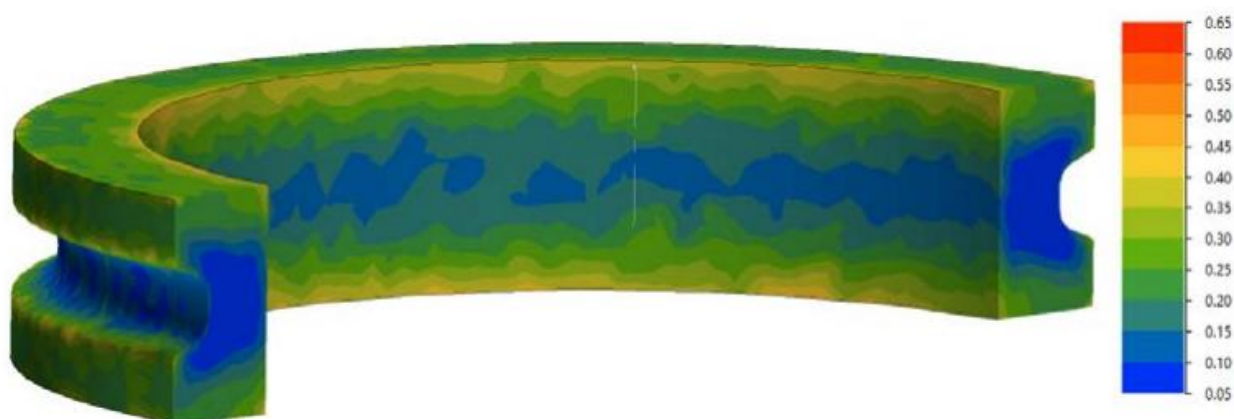


Рис. 5. Критерий истощения ресурса пластичности Кокрофта — Латама

Закключение. В рамках исследования было установлено, для формализации скорости подачи оправки можно использовать кусочно-линейную функцию, что позволяет не моделировать весь процесс целиком для определения

скорости подачи оправки, а изменять ее в зависимости от характеристик раскатки на каждом обороте кольца. Так для профильного кольца были подобрана скорость подачи оправки, которая не превышала 1,8 мм/с. Ускорение оправки во время раскатки для каждого оборота кольца не превысило $-0,03 \text{ мм/с}^2$. В результате моделирования было выяснено, что процесс раскатки протекал стабильно, температура находилось в необходимом диапазоне, а также отсутствовало разрушение.

Список источников

- [1] Xu W., Wang Q., Zhou X., Yang X. Quantitative design methodology for flat ring rolling process. 11th International Conference on Technology of Plasticity. Procedia Engineering. Nagoya, 2014, vol. 81. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.164>
- [2] Евдокимов Д.В. Исследование влияния кинематических параметров валков на качество раскатки. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2024, № 2, с. 23–28.
- [3] Giorleo L., Ceretti E., Giardini C. Energy consumption reduction in Ring Rolling processes: A FEM analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, vol. 74, pp. 55–64.
- [4] Томило В. А., Левкович В. В. Современные технологии изготовления крупногабаритных кольцевых заготовок. *Литье и Металлургия*, 2012, т. 3 (66).
- [5] Peng W.F., Niu B.K., Zhang J.H., Hong Z., Shu X.D. A 3D-FEM of adaptive movement control of guide and conical rolls in ring rolling process. *Int. J Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 92 (9–12). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0395-x>