

**В. В. Мишин\***, **И. А. Шишов**, **В. В. Паромов**<sup>1</sup>

Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург

\*m\_v\_v\_m@mail.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВЕРОЯТНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ТОНКОЙ БЕРИЛЛИЕВОЙ ФОЛЬГИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ**

В *ABAQUS* создана математическая модель процесса холодной прокатки фольг толщиной 12,5–100 мкм на 2-валковом стане с учетом упрочнения металла, упругой деформации прокатных валков, параметров трения на поверхности контакта. Выполнен анализ влияния технологических параметров холодной прокатки на вероятность разрушения бериллия в очаге деформации. Установлено, что наиболее благоприятная схема напряженно-деформированного состояния с точки зрения отсутствия разрушения бериллия наблюдается при прокатке с высоким коэффициентом трения.

*Ключевые слова:* холодная прокатка, тонкие бериллиевые фольги, метод конечных элементов, разрушение бериллия.

**V. V. Mishin, I. A. Shishov, V. V. Paromov**

## **INVESTIGATION OF THE COLD ROLLING PARAMETERS INFLUENCE ON THE FRACTURE PROBABILITY FOR THIN BERYLLIUM FOIL**

Mathematical model of cold rolling on a 2-roll mill for foils with a thickness of 12,5–100 μm was created in *ABAQUS*. Calculations were performed taking into account the character of metal hardening, elastic deformation of rolls and friction parameters on the contact surface. Analysis of cold rolling technological parameters influence on the fracture probability was performed. It was shown that the most preferred stress-strain state (from the point of view for beryllium fracture absence) is observed for rolling foils with a high friction coefficient.

*Key words:* cold rolling, thin beryllium foils, finite element method, beryllium fracture.

**Б**ериллиевые фольги широко применяются в современной рентгеновской технике в качестве материала для изготовления рентгеновских окон [1–2]. Основным способом получения тонких бериллиевых фольг является холодная прокатка, сопряженная, однако, со значительными технологическими трудностями, поскольку поликристаллический бериллий при комнатной температуре обладает крайне низкой пластичностью [3].

Целью данной работы является исследование влияния технологических параметров холодной прокатки на вероятность разрушения тонких бериллиевых фольг.

Задачу о расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) при холодной прокатке бериллиевой фольги решали методом конечных элементов в *ABAQUS*. Для уменьшения объема вычислений использовали двумерную постановку с условием симметрии. Моделировали холодную прокатку в валках диаметром 90 мм. Трение между поверхностью фольги и рабочего валка задавали с использованием модели Кулона. При расчетах межосевое расстояние валков считали неизменным, т. е. упругое растяжение клетки не учитывали. Рассматривали плоское деформированное состояние валка и фольги с учетом их упругого сплющивания, упрочнения материала фольги при прокатке, трения на поверхности контакта. Для сравнительного анализа НДС также были выполнены расчеты холодной прокатки отожженной алюминиевой фольги. Для валка использовали упругую модель среды, свойства которой задавали модулем упругости  $E = 210$  ГПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,3$  [4]. Для бериллия и алюминия использовали упругопластическую модель среды с упрочнением. Упругие свойства бериллия задавали модулем упругости  $E = 290$  ГПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,02$  [5]. Упругие свойства алюминия задавали модулем упругости  $E = 69$  ГПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,33$  [4]. Для моделирования пластического течения бериллия и алюминия задавали зависимости предела текучести  $\sigma_{0,2}$  от степени деформации (рис. 1), полученные экспериментально при помощи испытаний на растяжение фольг толщиной 50–100 мкм с различной накопленной деформацией при холодной прокатке.

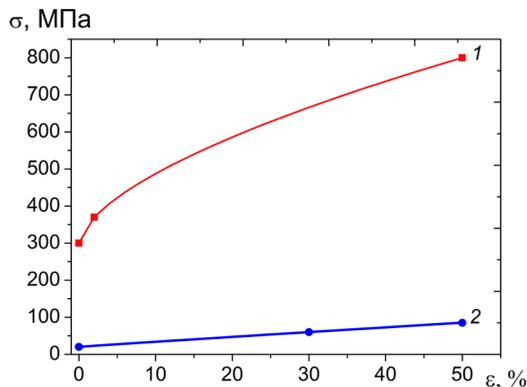


Рис. 1. Зависимости предела текучести  $\sigma_{0,2}$  от степени деформации для бериллия (1) и алюминия (2), полученные при помощи испытаний на растяжение фольг толщиной 50–100 мкм

На рис. 2 представлены рассчитанные эпюры контактных напряжений, возникающих в очаге деформации при прокатке алюминиевой и бериллиевой фольги толщиной 100 мкм с различными степенями деформации и коэффициентами трения. Расчеты показывают, что максимум контактных напряжений смещен в сторону выхода из очага деформации. Данный факт хорошо согласуется с литературными данными и обусловлен упрочнением металла в процессе холодной прокатки [6]. С повышением коэффициента трения  $\mu$  контактные напряжения увеличиваются, при этом характер эпюры практически не изменяется.

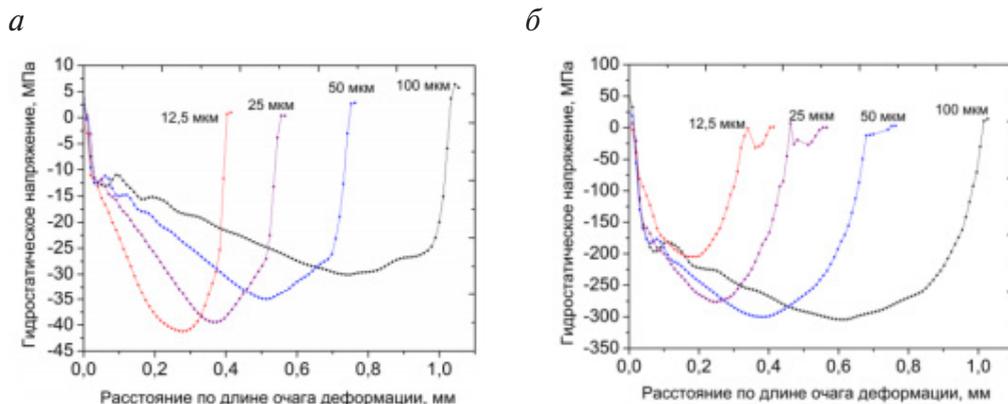


Рис. 2. Эпюры контактных напряжений в очаге деформации при прокатке алюминиевой — *а* и бериллиевой фольги — *б* с исходной толщиной 100 мкм со степенью деформации  $\epsilon = 20\%$  и различными значениями коэффициента трения  $\mu$

Для анализа влияния параметров холодной прокатки на вероятность разрушения бериллия была выполнена оценка уровня гидростатических напряжений («*hydrostatic stress*») и параметра жесткости напряженного состояния («*stress triaxiality*»).

Гидростатические напряжения вычисляются по формуле:

$$\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2,$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  — главные напряжения.

Параметр жесткости напряженного состояния может быть определен как

$$\eta = \sigma_0/\sigma_i,$$

где  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений (по Мизесу).

На рис. 3, 4 представлены эпюры гидростатических напряжений, возникающих в очаге деформации при прокатке алюминиевой и бериллиевой фольги толщиной 12,5–100 мкм с различной степенью деформации и различным коэффициентом трения. Из рис. 3 видно, что

холодная прокатка в диапазоне толщин 12,5–100 мкм характеризуется благоприятной с точки зрения отсутствия разрушения схемой НДС с преобладающим действием сжимающих напряжений. Исключение составляют узкие области на входе и выходе металла из очага деформации, соответствующие зонам упругой деформации, разрушение бериллия в которых маловероятно. Расчеты показали, что одним из способов повышения уровня гидростатических сжимающих напряжений при холодной прокатке бериллия и алюминия является увеличение коэффициента трения  $\mu$  (рис. 4).

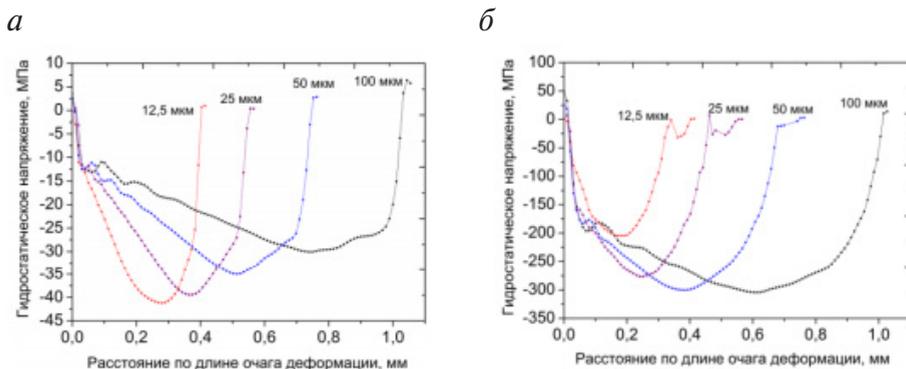


Рис. 3. Эпюры гидростатических напряжений в очаге деформации при прокатке алюминиевой — *а* и бериллиевой — *б* фольги толщиной 12,5–100 мкм со степенью деформации  $\varepsilon = 20\%$  и коэффициенте трения  $\mu = 0,03$

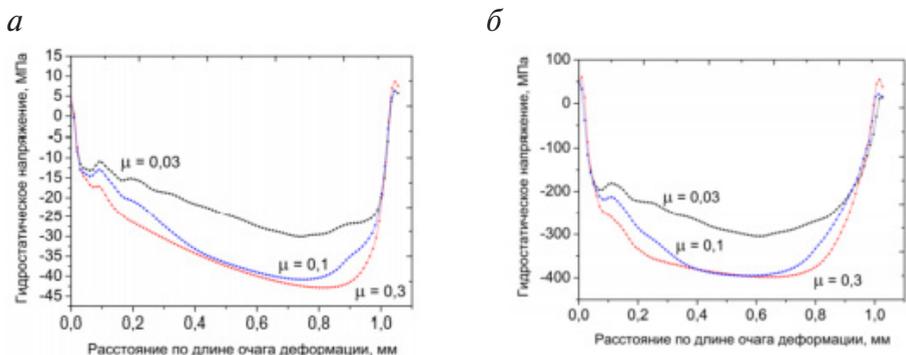


Рис. 4. Эпюры гидростатических напряжений в очаге деформации при прокатке фольги толщиной 100 мкм из алюминия — *а* и бериллия — *б* со степенью деформации  $\varepsilon = 20\%$  и различным коэффициенте трения  $\mu$

На рис. 5 представлены эпюры параметра жесткости напряженно-состояния  $\eta$  в очаге деформации при прокатке фольги толщиной 12,5–100 мкм из алюминия и бериллия. Как и в случае гидростатических напряжений, наиболее неблагоприятные с точки зрения разруше-

ния области (с наибольшим значением параметра жесткости НДС) соответствуют зонам упругой деформации. Разрушение возможно лишь в области входа и выхода металла в очаг деформации. По мере уменьшения толщины фольги параметр жесткости  $\eta$  уменьшается как для алюминия, так и для бериллия.

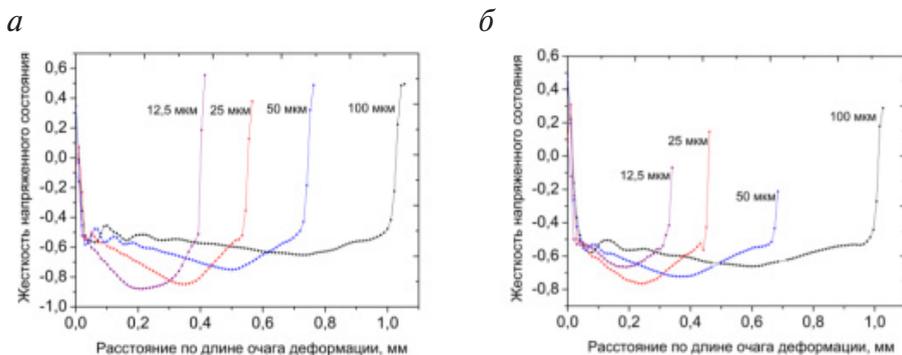


Рис. 5. Изменение жесткости напряженного состояния по длине очага деформации при прокатке алюминиевой — а и бериллиевой — б фольги толщиной 12,5–100 мкм со степенью деформации  $\epsilon = 20\%$  и коэффициенте трения  $\mu = 0,03$

Таким образом, выполненные расчеты показали, что характер НДС при холодной прокатке бериллиевой фольги благоприятен с точки зрения отсутствия разрушения практически для всей длины очага деформации за исключением узких зон упругой деформации в области входа металла в очаг деформации и выхода из него. Наиболее благоприятная схема НДС наблюдается при холодной прокатке с высоким коэффициентом трения на поверхности контакта (прокатка без смазки).

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (соглашение № МК-1402.2017.8).*

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Improved SDD detectors for ultra-fast, high-resolution EDS in microanalysis / A. Niculae [et al.] // Proceedings of Microscopy & Microanalysis. 2013. № 19, вып. S2. С. 1270–1271.
- 2 Investigation of the possibility of improving the x-ray fluorescence spectrometer analytical characteristics due to using the superfine beryllium foils/ V. V. Mishin [и др.] // Mater. Phys. Mech. (MPM). 2018. № 1, вып. 36. С. 92–99.
- 3 Бериллий. Наука и технология / Г. Дж. Лондон [и др.] М. : Металлургия, 1984. 624 с.
- 4 Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М. : Металлургия, 1973. 224 с.
- 5 Бериллий / под ред. Д. Уайта и Дж. Берка. М., 1960.
- 6 Дель Г. Д. Технологическая механика. М., 1978. 174 с.