

## Моделирование двухпроходного волочения некруглых труб на подвижной оправке

*С.В. Паршин, А.Р. Гомаа, Н.В. Семенова, П.С. Хлебников*

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург*

**Аннотация:** Разработана и обоснована конечно-элементная модель очага деформации при холодном волочении на подвижной оправке. Это позволяет определить состояние металла, рассчитать его поврежденность и форму канала волокна, при этом конфигурация первого перехода взята в качестве исходной для получения второго перехода.

**Ключевые слова:** профильная труба, волочение, очаг деформации, состояние металла, поврежденность, канал волокна.

Значительное отличие формы поперечного сечения от круглого при получении профильных труб путем холодного волочения, а также возникающее при этом большое упрочнение металла приводит к необходимости использования нескольких последовательно выполняемых переходов деформации с промежуточным отжигом. В настоящей статье рассмотрен второй переход деформации, а искомые механические параметры очага деформации приведены для двух переходов. При этом форма профиля первого перехода использована в качестве исходной для второго перехода. Описание очага деформации при первом переходе рассмотрено ранее [1]. Для второго перехода использована описанная ранее методика построения МКЭ-модели [2, 3]. Отличие здесь состоит в том, что для второго перехода форма и размеры входного сечения рабочего инструмента заданы выходными параметрами первого перехода и определение параметров заготовки не требуется. Однако далее необходимо определять форму и размеры рабочего канала профилирующей волокна.

В частности, для контактной поверхности на этом переходе записано условие ее минимума [4]. Это условие свели к уравнению Лапласа для всего семейства эквипотенциалей, определяющих изменение профиля последовательно расположенных сечений. Семейство линий тока описали

ортогональными к эквипотенциалам, а также к исходному и конечному контурам рабочего канала инструмента. На этой основе стало возможным построение продольного профиля волокна, которое описывали регулярными коноидами, учитывая при этом условие параллелизма [5]. Далее использовали конечные элементы конечные элементы в виде трехгранных пирамид, размеры которых должны достаточно плавно [6, 7] описать полученный профиль (рис. 1). Вместе с тем учитывали возможности применяемых вычислительных процессов [8, 9].

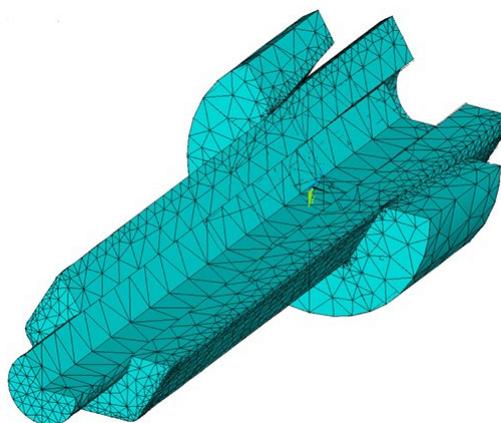
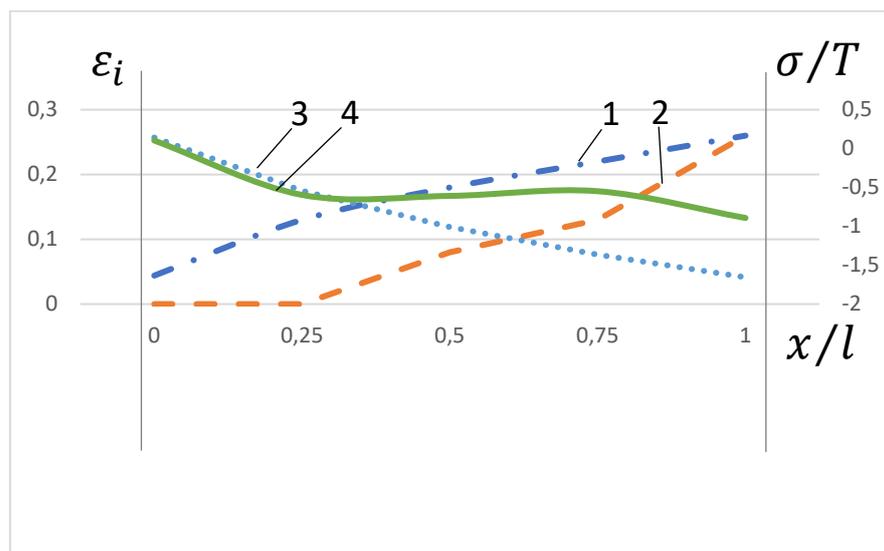
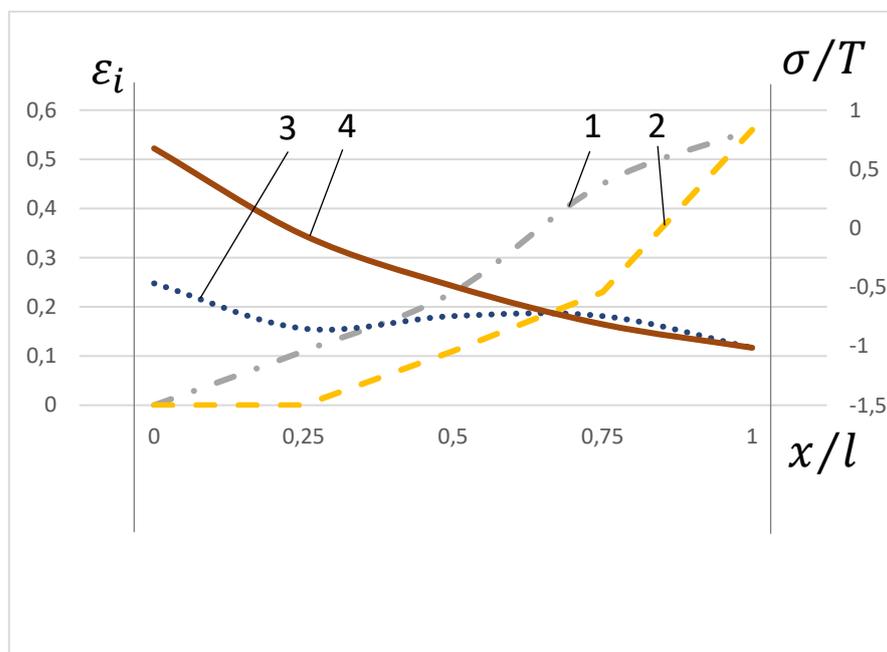


Рис. 1. – Конечно-элементная модель очага деформации на втором переходе (получение готовой трубы)

Конечно-элементная моделирование позволило определить формоизменение по объему металла и переходам волочения, находить деформированное и напряженное состояние, которое характеризовали инвариантам: интенсивностью деформации  $\varepsilon_i$  и показателем напряженного состояния  $\sigma/T$  ( $\sigma$  - гидростатическое давление,  $T$  интенсивность касательных напряжений). На рис. 2 указанные показатели приведены для точек профиля, расположенных на грани и ребре.



а



б

Рис. 2. Распределение на первом (а) и втором (б) переходе деформации инвариантов:  $\varepsilon_i$  (1 - по грани, 2 - по ребру) и  $\sigma/T$  (3 - по грани, 4 - по ребру) вдоль очага деформации.

Анализ этих кривых показывает, что вдоль очага деформации ( $x/l$ ) интенсивность деформации (величина безразмерная) нарастает в первом переходе до 0,76 как по грани профиля, так и по ребру, причём деформация по ребру начинается ранее границы геометрической вследствие наличия

внеконтактной деформации. После отжига (во втором переходе) значение этого показателя составляет около 0,5. Показатель напряженного состояния ( $\sigma/T$ ) на входе составляет положительную величину с уменьшением по очагу до отрицательных значений, причём для точек очага, расположенных на грани этот процесс более интенсивен. Во втором проходе характер этих зависимостей сохраняется. По полученным результатам определили на основе работы [10, 11] степень деформации до разрушения  $\lambda_p$  для данной марки материала и величину поврежденности  $\omega_0$ , которую нашли интегрированием отношения  $\lambda/\lambda_p$  вдоль траекторий перемещения частиц металла. Это величина для опасной точки поперечного сечения на выходе из очага деформации составила для первого прохода  $\omega_0^I = 0,373$ , а для второго прохода  $\omega_0^{II} = 0,455$ . Такие значения не превышают допустимые [12] и после термообработки дефекты залечиваются. Таким образом рассмотренные технология двухпроходной волочения с последующими отжигами обеспечивает необходимое качество протянутых труб. В результате выполнения работы найдено формоизменение металла, рациональные параметры рабочего инструмента, размеры заготовки, инварианты деформированного и напряженного состояния. Для получения профилированных труб следует проводить их отжиг (восстановление пластичности) как после первого, так и второго переходов волочения. Это позволяет рекомендовать рассмотренную методику для практического использования при составлении маршрутов деформирования.

### Литература

1. Паршин С.В., Гомаа А.Р., Семенова Н.В., Хлебников П.С. Моделирование процесса длиннооправочного волочения профильных труб// Инженерный вестник Дона, 2025, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9863](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9863).
-

2. Паршина, А.А. Определение профиля рабочего инструмента для волочения труб с переменной толщиной стенки // Производство проката. – 2017. – №3. – С.36 – 48.
  3. Данченко В.Н., Сергеев В.В., Никулин Э.В. Производство профильных труб. М: Интермет Инжиниринг, 2003. – 224 с.
  4. Овчинников М.А., Сокол В.А., Соловьева О.Ю., Тарасова Т.А., Грецова Н.В., Клячина Н.В., Лагунов Е.Н. Математическое моделирование изделий из композитных материалов с заданными свойствами // Инженерный вестник Дона, 2023, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8131](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8131)
  5. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложения М: Мир, 1972. – 319 с.
  6. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. – 604 с.
  7. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. (пер. с англ.) М.: Мир, 1984. – 428 с.
  8. Богатов А.А., Смирнов С.В., Колмогоров В.Л. Математическая модель повреждения металла при многоступенчатом волочении прутков и проволоки // Известия вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 4. – С.131–133.
  9. Богатов А.А., Смирнов С.В., Колмогоров В.Л. Условие разрушения металлов при знакопеременном деформировании с произвольной формой цикла // Известия вузов. Черная металлургия. – 1973. – № 4. – С.102–104.
  10. Богатов, А. А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
-

11. Boutenel F., Delhomme M., Velay V., and Boman R. Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes // *Comptes Rendus Mecanique*. 2018. Vol. 346. pp. 665–677;
12. Okulov R.A., Semenova N.V. Influence of contact friction on the shaping of profiled pipes of cold mandrel-free drawing // *AIP Conference Proceedings*, 2022, V. 2456, p. 020034.

### References

1. Parshin S.V., Gomaa A.R., Semenova N.V., Khlebnikov P.S. *Inzenernyj vestnik Dona*. 2025, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9863](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9863)
  2. Parshina A.A. *Proizvodstvo prokata*. 2017. №3. pp. 36-48.
  3. Danchenko V.N., Sergeev V.V., Nikulin Je.V. *Proizvodstvo profil'nyh trub [Production of profile tubes]*. M: Internet Inzhiniring, 2003. 224 p.
  4. Ovchinnikov M.A., Sokol V.A., Solov'yeva O.YU., Tarasova T.A., Gretsova N.V., Klyachina N.V., Lagunov Ye.N. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2023, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8131](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8131).
  5. Alberg Dzh., Nil'son Je., Uolsh Dzh. *Teoriya splajnov i ee prilozhenija [Spline theory and its applications]*. M: Mir, 1972. 319 p.
  6. Rodzhers D., Adams Dzh. *Matematicheskie osnovy mashinnoj grafiki [Mathematical foundations of computer graphics]*. M.: Mir, 2001. 604 p.
  7. Gallager R. *Metod konechnyh jelementov. Osnovy [Finite element method]*. M.: Mir, 1984. 428 p.
  8. Bogatov A.A., Smirnov S.V., Kolmogorov V.L. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija*. 1984. № 4. pp.131–133.
  9. Bogatov A.A., Smirnov S.V., Kolmogorov V.L. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija*. 1973. № 4. pp.102–104.
  10. Bogatov, A. A., Mizhirickij O.I., Smirnov S.V. *Resurs plastichnosti pri obrabotke metallov davleniem [Plasticity resource during metal forming]*. M.: Metallurgija, 1984. 144 p.
-



11. Boutenel F., Delhomme M., Velay V., and Boman R. Comptes Rendus Mecanique. 2018. Vol. 346. pp. 665–677;
12. Okulov R.A., Semenova N.V. AIP Conference Proceedings, 2022, V. 2456, p. 020034.

**Дата поступления: 28.01.2025**

**Дата публикации: 10.03.2025**