

УДК 621.774.37

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ

Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В., Бурдина Ю.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**Аннотация.** В работе предложена методика оптимизации технологического волочильного инструмента из условия обеспечения минимального напряжения при волочении. Рассмотрен производственный эксперимент волочения алюминиевой проволоки с использованием оптимальной геометрии волочильного инструмента, эффективность оптимизации. Сопоставлены напряжения волочения с использованием инструмента оптимальной геометрии и инструмента неоптимальной геометрии. Показано влияние противонапряжения на величину оптимальных углов волочильного инструмента.

**Ключевые слова:** волочение, волочильный инструмент, оптимизация, оптимальный угол волоки, противонапряжение.

### Введение

При обработке металлов давлением находит применение процесс волочения, заключающийся в протягивании заготовки через волочильный инструмент. При волочении сечение заготовки принимает сечение конического волочильного инструмента. Данный процесс наиболее широко применяется при производстве проволоки и прутков, имеющих поперечное сечение в форме круга [1, 2].

Как и любой процесс обработки металлов давлением, волочение характеризуется определенной энергоемкостью, снижение которой является актуальной проблемой.

Энергосиловые параметры при волочении определяются главным образом геометрией волочильного инструмента, одной из основных характеристик при этом является  $\alpha_b$  – угол наклона образующей рабочего конуса волочильного инструмента к оси волочения [3]. Оптимизация угла  $\alpha_b$  позволяет обеспечить минимальные значения напряжения волочения, что дает возможность снизить энергопотребление, уменьшить вероятность обрыва переднего конца заготовки, повысить единичные обжатия и стойкость волочильного инструмента.

### Теория, материалы и методы исследования

При выполнении технологических расчетов для определения напряжения волочения наибольшей вероятностью пользуется упрощенная формула И.Л. Перлина [1]

$$\sigma_{вол} = \ln \frac{F_0}{F_1} [\sigma_{sc} + f \operatorname{tg} \alpha_{II} (\sigma_{sc} - \sigma_0)] + \sigma_0, \quad (1)$$

где  $F_0$  и  $F_1$  – площади сечения до и после прохода соответственно;  $\sigma_{sc}$  – усредненное по зоне деформации сопротивление деформации протягиваемого металла;  $f$  – коэффициент внешнего трения между обрабатываемым металлом и волочильным инструментом;  $\alpha_{II}$  – приведенный угол волоки, учитывающий наличие калибрующего пояска;  $\operatorname{tg} \alpha_{II} = 0,65 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon$ ;  $\alpha_\epsilon$  – угол наклона образующей волоки к оси волочения;  $\sigma_0$  – напряжение противонапряжения.

В формуле (1) отношение площадей  $F_0$  и  $F_1$  является коэффициентом вытяжки, который для прутков и проволоки круглого сечения имеет вид

$$\lambda = \frac{F_0}{F_1} = \frac{d_0^2}{d_1^2}. \quad (2)$$

Недостатком формулы (1) является то, что она не позволяет определить оптимальный угол волочильного инструмента. Это связано с тем, что множитель  $F_0 / F_1 = \ln \lambda$  трактуется в формуле (1) как степень деформации при волочении, которая не учитывает дополнительные сдвиговые деформации на входе в волоку и выходе из нее.

В работе [4] предложена уточненная формула для определения средней степени деформации за проход при волочении, учитывающая сдвиговые деформации на входе в волочильный инструмент и выходе из него:

$$\epsilon_{cp} = \ln \lambda + \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_\epsilon}{3\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Степень деформации в формуле (3) определяется, как  $\ln \lambda$ , и дополнена вторым слагаемым, которое учитывает дополнительные сдвиговые деформации в технологическом инструменте.

С учетом формулы (3) предложена уточненная формула для напряжения волочения [4].

$$\sigma_{вол} = \left( \ln \lambda + \frac{4tg\alpha_{\epsilon}}{3\sqrt{3}} \right) \times \times [\sigma_{sc} + fctg\alpha_{\Pi}(\sigma_{sc} - \sigma_0)] + \sigma_0. \quad (4)$$

В отличие от формулы (1) формула (4) позволяет определить оптимальное значение угла конусности волочильного инструмента из условия минимума напряжения волочения

$$\partial \sigma_{вол} / \partial tg\alpha_{\epsilon} = 0. \quad (5)$$

Продифференцировав выражение (4) согласно условию (5), после преобразований и упрощений получим соотношение для определения оптимального значения  $tg\alpha_{\epsilon}$  [5,6]:

$$tg\alpha_{\epsilon}^{opt} = 1,414 \sqrt{f(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{sc}}) \ln \lambda}. \quad (6)$$

И соответственно

$$\alpha_{\epsilon}^{opt} = \arctg \left[ 1,414 \sqrt{f(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{sc}}) \ln \lambda} \right]. \quad (7)$$

Аналогичный подход к определению оптимальных углов технологического инструмента использован в работе [7].

Из формулы (7) следует, что оптимальные углы конусности возрастают с увеличением коэффициента трения и коэффициента волочения.

### Результаты исследования и их обсуждение

С целью проверки полученных результатов в ОАО «Камкабель» проведены испытания по усовершенствованию технологии волочения алюминиевой проволоки по маршруту 14,0-12,7-10,7-9,00-7,60-6,56 мм со скоростью волочения 3,57 м/с.

По существующей на заводе технологии угол рабочей зоны составляет  $18^\circ$ . Маршрут волок прослеживали (проводили чистку, осмотр и оценку состояния поверхности наклона волок, измерение диаметра выходной волоки). До полного износа маршрута было протянуто 166,6 км алюминиевой проволоки диаметром 6,56 мм. По

предложенной технологии твердосплавные волокнистые элементы имели расчетный оптимальный угол рабочей зоны  $28^\circ$ . Контроль за состоянием волок включал те же элементы контроля. До полного износа волок по заведенному маршруту общее количество произведенной алюминиевой проволоки составило 475,7 км.

Таким образом, при использовании волок с оптимальным углом рабочей зоны  $28^\circ$  увеличивает выпуск алюминиевой проволоки на одном маршруте в 2,9 раза по сравнению с существующим маршрутом. Качество поверхности проволоки было удовлетворительным.

Можно полагать, что увеличение стойкости волок связано с изменением силовых условий волочения за счет оптимизации геометрии волочильного инструмента, что привело к снижению действующих на инструмент усилий.

С целью оценки эффективности оптимизации геометрии волочильного инструмента выполнили сопоставление напряжения волочения при использовании инструмента оптимальной и произвольной геометрии.

На рис. 1 приведены расчетные значения отношения напряжения волочения, рассчитанное по формуле (4), к напряжению волочения, рассчитанного по такой же формуле, но для оптимальных значений угла  $\alpha_{\epsilon}$ .

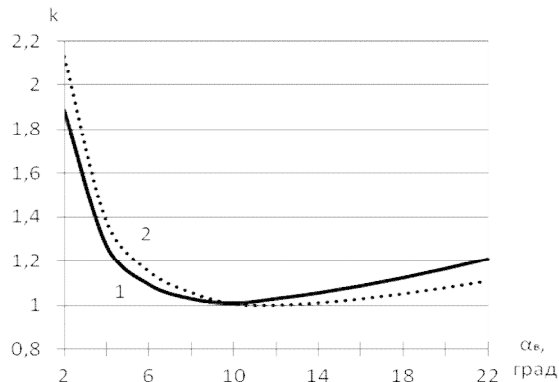


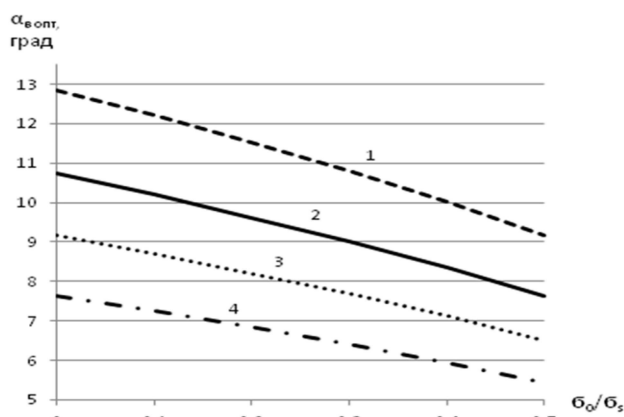
Рис. 1. Эффективность оптимизации геометрии волочильного инструмента

Расчет выполнен для коэффициента граничного трения  $f = 0.10$  и коэффициентов вытяжки  $\lambda = 1.2$  (кривая 1) и  $\lambda = 1.3$  (кривая 2).

Как следует из рис. 1, минимальное значение отношения, равное единице, соответствует оптимальному углу  $\alpha_{\epsilon}$ . По мере удаления от оптимального значения отношение напряжений становится больше единицы, интенсивность увеличения напряжения волочения особенно характерна для  $\alpha_{\epsilon} < \alpha_{\epsilon}^{opt}$ .

Данные, приведенные на **рис. 1**, согласуются с результатами конечно-элементного моделирования процесса волочения изделий круглого сечения, которые определяют зону оптимальных углов рабочего конуса волоки в интервале  $9-12^\circ$  [8].

В формулу напряжения волочения (4) входит противонапряжение, роль которого в технологии волочения является малоизученной. Известно лишь, что противонапряжение существенно изменяет условия деформации металла, способствует уменьшению внешнего трения и повышению стойкости волок [8–10]. По приведенной методике выполнена оптимизация углов волочильного инструмента в зависимости от величины противонапряжения, отнесенного к сопротивлению деформации. Результаты расчета приведены на **рис. 2**.



**Рис. 2. Зависимость оптимальных углов от противонапряжения:**

- 1-  $\lambda = 1.2$ ,  $f = 0.05$ ; 2-  $\lambda = 1.2$ ,  $f = 0.05$ ;  
3-  $\lambda = 1.3$ ,  $f = 0.05$ ; 4-  $\lambda = 1.3$ ,  $f = 0.10$

Из **рис. 2** следует, что с увеличением противонапряжения значения оптимальных углов уменьшаются.

## Выводы

1. Приведена методика оптимизации углов технологического инструмента при волочении.
2. На примере волочения алюминиевой проволоки в заводских условиях показана эффективность оптимизации углов волочильного инструмента.
3. Расчетным путем показано влияние оптимальных углов волочильного инструмента на величину напряжения волочения.
4. Показано влияние противонапряжения на величину оптимальных углов инструмента.

## Список литературы

1. Перлин И.Л., Еманюк М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1972. 448 с.
2. Ерманок М.З. Развитие теории волочения // Цветная металлургия, 1986. №9. С. 81–83.
3. Колмогоров Г.Л., Ковалев А.Е., Бажин А.А. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2002. №9. С. 64–65.
4. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
5. Пат. 2310533 Российская Федерация, МПК В 21с 1/00. Способ волочения изделий / Колмогоров Г.Л., Латышева Т.В., Мельникова Т.Е.; патентообладатель ПНИПУ. №2006112366/02; опубл. 20.11.2007.
6. Пат. 2404873 Российская Федерация, МПК 21с 1/00. Способ волочения прутковых и проволоочных изделий / Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В.; патентообладатель ПНИПУ. №2009137345/02; опубл. 27.11.2010.
7. Колмогоров Г.Л., Снигирева М.В., Аверьянова Е.М. Оптимизация технологии производства полиметаллических сверхпроводниковых композитов // Металлург. 2014. №12. С. 72–76.
8. Моделирование процесса волочения круглых изделий с противонапряжением / Каргин В.Р., Колесникова С.Ю., Сергеев Ю.А., Каргин Б.В. // Металлург. 2014. №10. С. 66–70.
9. Торнавский А.Л. Эффективность волочения с противонапряжением. М.: Металлургия, 1959. 152с.
10. Леванов А.Н. Колмогоров В.Л., Буркин С.П. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1976. 416 с.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

### EFFICIENCY OF OPTIMIZATION OF A DRAWING TOOL GEOMETRY

**Kolmogorov German Leonidovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: dpm@pstu.ru.

**Chernova Tatyana Vyacheslavovna** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: dpm@pstu.ru.

**Burdina Yuliya Alexandrovna** – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: dpm@pstu.ru.

**Abstract.** This paper describes methods to optimize a drawing tool ensuring minimum stress during drawing. Industrial experiments of drawing aluminum wire with the optimal drawing tool geometry showed efficiency of such optimization. Drawing stresses of tools with an optimal

geometry and non-optimal one were compared. The authors showed how back force influenced values of optimal angles of drawing tools.

**Keywords:** Drawing, drawing tool, optimization, optimal die angle, back force

## References

1. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [The theory of drawing]. Moscow: Metallurgy, 1972, 448 p.
2. Ermanok M.Z. Development of the theory of drawing. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy]. 1986, no. 9, pp. 81-83.
3. Kolmogorov G.L., Kovalev A.E., Bazhin A.A. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2002, no. 9, pp. 64-65.
4. Kolmogorov G.L. *Gidrodinamicheskaya smazka pri obrabotke metallov davleniem* [Hydrodynamic lubrication for metal forming]. Moscow: Metallurgy, 1986, 168 p.
5. Kolmogorov G.L., Latysheva T.V., Melnikova T.E. *Sposob volocheniya izdelij* [A method of drawing products]. Patent RF, no. 2310533, 2007.
6. Kolmogorov G.L., Chernova T.V. *Sposob volocheniya prutkovykh i provolochnykh izdelij* [A method of drawing rod and wire products]. Patent RF, no. 2404873 2010.
7. Kolmogorov G.L., Snigireva M.V., Averianova E.M. Optimization of production technology for polymetallic superconducting composites. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014, no. 12, pp. 72-76.
8. Kargin V.R., Kolesnikova S.Yu., Sergeev Yu.A., Kargin B.V. Simulation of the process of drawing round products with back force. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014, no. 10, pp. 66-70.
9. Tornavsky A.L. *Ehffektivnost' volocheniya s protivonatyazheniem* [Efficiency of drawing with back force]. Moscow: Metallurgy, 1959, 152 p.
10. Levanov A.N., Kolmogorov V.L., Burkin S.P. *Kontaktnoe trenie v protsessakh obrabotki metallov davleniem* [Contact friction in metal forming processes]. Moscow: Metallurgy, 1976, 416 p.

Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В., Бурдина Ю.А. Эффективность оптимизации геометрии технологического инструмента для волочения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 55–58.

Kolmogorov G.L., Chernova T.V., Burdina Yu.A. Efficiency of optimization of a drawing tool geometry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 55–58.

УДК 621.771.63

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ ПРОФИЛЕГИБОЧНЫХ СТАНОВ

Шемшурова Н.Г.<sup>1</sup>, Корнилов В.Л.<sup>2</sup>, Антипанов В.Г.

<sup>1</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>АНО ДПО «КЦПК «Персонал», Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Определены рациональные принципы разработки калибровок валков для производства гнутых профилей различного типа. Они позволят корректировать исходную калибровку, повышая эффективность ее использования, и формализовать поиск улучшенного технического решения. Методика может быть заложена в программу научно обоснованного автоматизированного расчета калибровки валков.

**Ключевые слова:** принципы разработки калибровки валков, сортовые гнутые профили, гофрированные профили, профили высокой жесткости.

### Введение

Гнутые профили позволяют экономить металл при производстве конструкций, снижают вес оборудования, сокращают трудозатраты на сборку и являются более дешевыми по сравнению с другими видами проката.

Калибровка валков является основой технологического процесса профилирования. Задача калибровки – получение из плоской заготовки гнутого профиля заданной конфигурации за минимальное число проходов [1–12].

Однако:

– с уменьшением числа проходов необходимо увеличивать углы подгибки, которые не должны превышать предельно допускаемые значения, определяемые:

- способностью металла к деформации;
- конструкцией и формой калибров валков;
- условиями задачи полосы в калибр;

– допустимостью искажения геометрии профиля и др.;

– уменьшение числа проходов при формовке связано с повышением энергозатрат и увеличением износа валков.

Разработка принципов калибровки валков предусматривает:

1) возможность формовки профиля требуемой конфигурации с гарантией качественного получения конструктивно важных размеров;

2) минимальный износ валков;

3) минимальные энергозатраты;

4) минимальную трудоемкость изготовления и настройки валков;

5) минимальные остаточные напряжения в профиле;

6) необходимое и достаточное количество металла в месте изгиба;

7) выбор основной оси профилирования, промежуточных форм профиля, внутренних ра-