Registered in Germany Europa Revue Journal
ISSN: 1862-6564 Vol. 6 No. 10 (2026) Published October 10, 2026

MATHEMATICAL MODELLING AND INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF A RESOURCE-SAVING WIRE DRAWING PROCESS COMBINING DIE AND DIELESS DEFORMATION

Tsypkina Viktoriya Vyacheslavovna
Professor of the Department of Engineering of Electrical Machines and Drives, Faculty of Energy Engineering, Tashkent State Technical University
Ivanova Vera Pavlovna
Associate Professor of the Department of Engineering of Electrical Machines and Drives, Faculty of Energy Engineering, Tashkent State Technical University
Aliev Tokhirjon Igamberdievich
OOO "SUXSMARTIT" Specialist

Abstract

The paper considers the problem of increasing the efficiency of the wire drawing process through a rational distribution of deformation between the die and dieless sections of the technological system. The relevance of the study is determined by the need to reduce operating costs in the production of cable and wire products, to extend the service life of expensive drawing tools and to ensure stable geometric parameters of the finished product. An approach to the mathematical modelling of a resource-saving drawing mode based on combining die and dieless deformation is proposed. Unlike the traditional view of the process as a sequence of independent operations, the technological system is considered as a set of interrelated elements forming a single force and energy mode of processing the metal billet. The billet, the drawing tool, the pulling mechanism and an additional unit generating the tensile force are identified as the main objects of analysis. The structure of an information model is developed that links the geometric characteristics of the billet, the physical and mechanical properties of the material, the contact conditions, the drawing force, the partial elongation, the wire speed and the intermediate diameters. On this basis, a mathematical description of the existing and modernized versions of the technological system is proposed. The modelling makes it possible to assess in advance the effect of the additional tensile action on the force parameters of the process, the technological modes and the operating

conditions of the drawing tool without risky full-scale experiments on industrial equipment. The results can be used to select rational drawing modes, to extend the service life of the tool and to justify technical solutions for the modernization of drawing equipment.

Keywords

wire drawing, cable production, mathematical modelling, information model, die deformation, dieless deformation, resource saving, drawing force, drawing tool, technological process.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ПРИ СОВМЕЩЕНИИ ФИЛЬЕРНОГО И БЕСФИЛЬЕРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

ЦЫПКИНА В.В., ИВАНОВА В.П., АЛИЕВ Т.И.

Цыпкина Виктория Вячеславовна, профессор кафедры «Инженерия электрических машин и приводов», факультета Инженерия энергетики, ТашГТУ; ☎ +99893 3980628; E-mail: c-victory@yandex.ru

Иванова Вера Павловна, доцент кафедры «Инженерия электрических машин и приводов», факультета Инженерия энергетики; ☎ +99890 3239782; E-mail: veronika.tsipkina@yandex.ru

Алиев Тохиржон Игамбердиевич,

ООО “SUXSMARTIT” специалист ☎ +99890 9710610

Аннотация.

В статье рассматривается задача повышения эффективности технологического процесса волочения проволоки за счет рационального распределения деформации между фильерным и бесфильерным участками технологической системы. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения эксплуатационных затрат при производстве кабельно-проводниковой продукции, повышения ресурса дорогостоящего волочильного инструмента и обеспечения стабильности геометрических параметров готового изделия. Предложен подход к математическому моделированию

ресурсосберегающего режима волочения, основанный на совмещении фильерного и бесфильерного деформирования. В отличие от традиционного представления процесса как последовательности независимых операций, технологическая система рассматривается как совокупность взаимосвязанных элементов, формирующих единый силовой и энергетический режим обработки металлической заготовки. В качестве основных объектов анализа выделены заготовка, волочильный инструмент, тянущий механизм и дополнительный узел формирования растягивающего усилия. Разработана структура информационной модели, устанавливающей взаимосвязь между геометрическими характеристиками заготовки, физико-механическими свойствами материала, условиями контактного взаимодействия, силой волочения, частной вытяжкой, скоростью перемещения проволоки и промежуточными диаметрами. На основе сформированной структуры предложено математическое описание существующего и модернизированного вариантов технологической системы. Моделирование позволяет предварительно оценивать влияние дополнительного растягивающего воздействия на силовые параметры процесса, технологические режимы и условия работы волочильного инструмента без проведения рискованных натурных экспериментов на промышленном оборудовании. Полученные результаты могут использоваться для выбора рациональных режимов волочения, повышения эксплуатационного ресурса инструмента и обоснования технических решений по модернизации волочильного оборудования.

Ключевые слова: волочение проволоки, кабельное производство, математическое моделирование, информационная модель, фильерное деформирование, бесфильерное деформирование, ресурсосбережение, сила волочения, волочильный инструмент, технологический процесс.

Введение. Совершенствование технологии производства кабельно-проводниковой продукции непосредственно связано с необходимостью повышения эффективности операций пластической обработки металла. Для процесса волочения данная задача определяется не только требованием увеличения производительности оборудования, но и необходимостью

рационального использования технологического инструмента, снижения энергетических и материальных потерь, а также обеспечения устойчивости параметров готовой проволоки.

Волочильное оборудование относится к сложным электромеханическим системам, в которых характеристики получаемого изделия формируются в результате совместного действия механических, технологических и энергетических факторов. Поэтому изменение одного из параметров процесса неизбежно отражается на состоянии других элементов системы. В частности, увеличение скорости перемещения проволоки сопровождается изменением силовых и тепловых нагрузок, режима работы привода и условий взаимодействия металла с волочильным инструментом.

Одним из основных показателей функционирования волочильной машины является производительность. Ее повышение традиционно связывают с увеличением скорости волочения. Однако увеличение скорости само по себе не обеспечивает необходимого результата, если сопровождается ростом количества остановок, снижением стойкости инструмента или увеличением вероятности возникновения дефектов. Поэтому повышение производительности должно рассматриваться как комплексная задача, включающая оптимизацию скоростного режима, сокращение непроизводительных простоев и совершенствование средств автоматического управления технологическим процессом.

Методы исследования. Дополнительный резерв повышения экономической эффективности может быть получен за счет изменения характера распределения деформации по длине технологической линии. Одним из вариантов такого решения является совместное использование фильерного и бесфильерного участков волочения [1]. В данном случае часть технологической деформации реализуется за счет дополнительного растягивающего воздействия на проволоку после выхода из чистовой волоки.

Практический интерес такого способа обусловлен возможностью уменьшения интенсивности воздействия на дорогостоящий волочильный инструмент и, соответственно, увеличения продолжительности его эксплуатации.

По данным [1], ожидаемый экономический эффект от применения данного подхода может достигать 25 %, что связано прежде всего с повышением ресурса импортного алмазного инструмента.

Обсуждение и полученные результаты. Реализация предложенного принципа на существующем оборудовании требует формирования дополнительного силового воздействия на выходном участке волочильной машины. Для этого предусматривается установка вспомогательного узла, расположенного после чистовой волоки. Создаваемое им дополнительное растягивающее усилие обеспечивает получение необходимой деформации проволоки при сохранении заданного конечного диаметра изделия.

При этом модернизация существующей конструкции не может рассматриваться исключительно как задача механического добавления нового узла. Изменение силовой схемы волочильной машины приводит к перераспределению нагрузок между ее элементами и может повлиять на установившийся технологический режим. Следовательно, до практической реализации необходимо определить диапазон допустимых параметров работы модернизированной системы.

Проведение такой оценки непосредственно на промышленном оборудовании сопряжено с определенным техническим риском. Несоответствие расчетных параметров реальным условиям процесса может привести к повышению нагрузки на привод, увеличению напряжений в рабочих элементах, ускоренному износу инструмента либо возникновению нештатных режимов. По этой причине предварительное математическое и информационное моделирование рассматривается как необходимый этап обоснования предлагаемого технического решения.

В рамках исследования последовательность моделирования включает два взаимосвязанных уровня:

1. формирование информационного представления, существующего и предлагаемого вариантов технологического процесса;

2. построение математического описания волочильной машины, позволяющего сопоставить параметры исходной и модернизированной систем.

Такое разделение дает возможность сначала установить структуру взаимосвязей между физическими явлениями и технологическими параметрами, а затем использовать полученную структуру для количественной оценки поведения системы.

Информационная модель в данном случае не является только графическим представлением волочильной машины. Ее назначение заключается в формализации причинно-следственных связей между исходными характеристиками заготовки, условиями ее взаимодействия с инструментом, силовыми параметрами процесса и характеристиками готовой проволоки.

При построении модели учитываются геометрические, механические и физические особенности процесса. Основными исходными характеристиками выступают размеры заготовки и свойства обрабатываемого материала. В процессе прохождения проволоки через технологические элементы возникают силы сопротивления деформации, силы трения и тепловые эффекты, сопровождающие пластическое формоизменение металла.

Для повышения достоверности модели необходимо учитывать не только непосредственные эффекты пластической деформации, но и сопутствующие физические явления, способные изменить состояние исследуемой системы. Именно совокупность таких воздействий определяет конечный результат технологического процесса и должна учитываться при разработке технического решения [2, 3].

Формирование информационной модели осуществляется посредством последовательного отбора физических эффектов и параметров, оказывающих существенное влияние на рассматриваемый процесс. Принцип построения такой модели представлен на рис. 1.

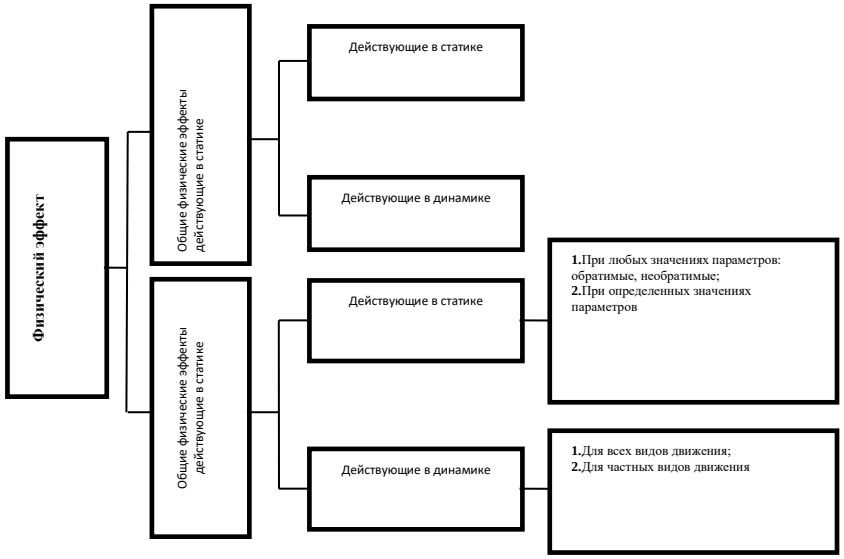


Рис. 1. Схема формирования информационной модели процесса волочения на основе последовательного отбора физических эффектов

На начальном уровне рассматриваются физические явления, характерные для процесса в целом. Далее из общей совокупности выделяются эффекты, непосредственно связанные с конкретными элементами технологической системы. Для каждого такого элемента устанавливается набор параметров, позволяющий оценить его влияние на силовые, энергетические и геометрические характеристики волочения.

В качестве исходных геометрических параметров рассматриваются диаметр поступающей заготовки и диаметры проволоки после отдельных стадий деформации. Дополнительно учитываются характеристики материала, включая его химический состав и физико-механические свойства.

Для описания условий взаимодействия проволоки с волочильным инструментом в модель вводятся коэффициент трения, тепловыделение и величина отхода металла. Совокупность указанных факторов определяет условия формирования силы волочения и влияет на распределение нагрузки по элементам технологической системы.

К числу основных выходных параметров модели относятся:

- частная вытяжка в отдельной волоке;
- коэффициент относительного опережения;
- коэффициент запаса;

- сила волочения;
- промежуточный диаметр проволоки;
- скорость движения проволоки.

Особое место в модели занимает геометрическая связь между исходным и конечным сечением металла. При разработке технологического маршрута необходимо обеспечить согласованность диаметров на последовательных стадиях обработки и выполнение условия сохранения объема металла.

Несогласованность хотя бы одного из этих параметров способна привести к отклонению конечных характеристик изделия от заданных значений.

Таким образом, качество готовой проволоки определяется не отдельным параметром, а совокупным результатом взаимодействия геометрических характеристик, свойств материала, силового режима и условий контакта с инструментом.

Виртуальное представление исследуемой технологической системы приведено на рис. 2.

В предлагаемом представлении процесс волочения рассматривается как последовательное преобразование состояния металлической заготовки при ее прохождении через функционально связанные элементы оборудования. Каждый элемент изменяет определенную совокупность параметров материала и передает результат своего воздействия следующему звену технологической цепи.

Условно технологическую систему можно представить в виде последовательности:

1. заготовка;
2. нагнетающая волока;
3. рабочая волока;
4. тянущая шайба;
5. готовая проволока.

При таком представлении тянущий механизм выполняет функцию формирования перемещающего усилия, необходимого для протягивания металла

через волочильный инструмент. Силовой параметр, характеризующий данное воздействие, определяется величиной силы волочения.

Волочильная волока, в свою очередь, обеспечивает изменение геометрии поперечного сечения проволоки и формирование требуемых характеристик поверхности. Таким образом, взаимодействие тянущего механизма и волочильного инструмента определяет основные условия деформации металла [1, 2].

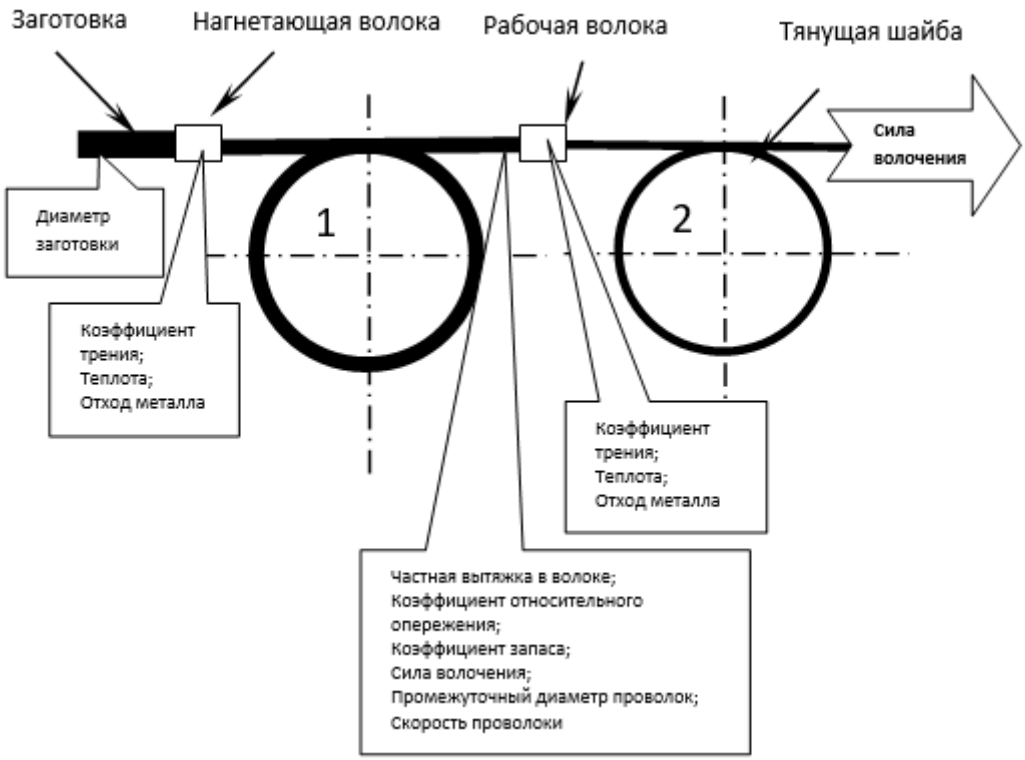


Рис. 2. Виртуальная модель технологического процесса волочения

Металлическая заготовка является центральным объектом модели, поскольку именно через ее параметры проявляется результат воздействия всех элементов технологической системы. Изменение диаметра, скорости, температуры и силового состояния проволоки на каждом этапе отражает результат предшествующего воздействия и одновременно формирует начальные условия для последующей стадии.

Предложенная структура информационной модели позволяет перейти от качественного описания физических явлений к количественной оценке комбинированного способа волочения. Особое значение при этом имеет определение изменения нагрузки на оборудование, возникающего вследствие введения дополнительного растягивающего воздействия.

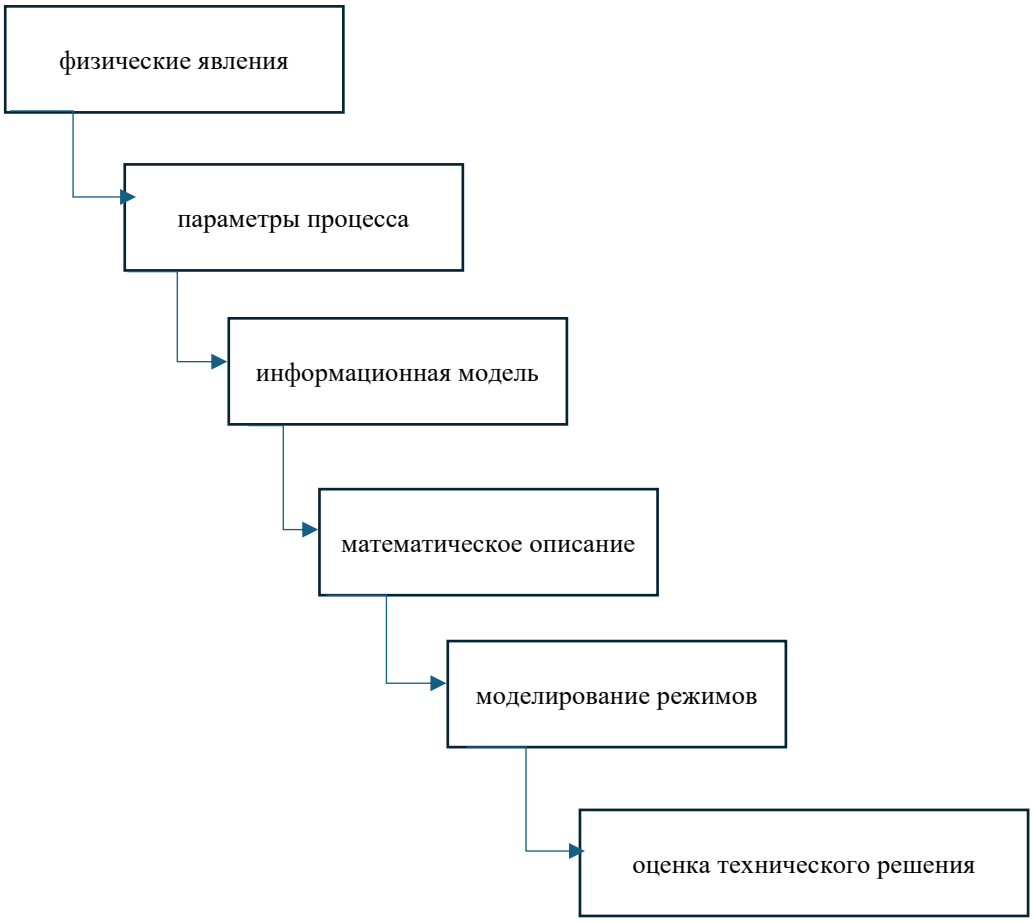
В отличие от непосредственного экспериментирования на промышленной волочильной машине, моделирование позволяет исследовать различные варианты технологических режимов без возникновения реального риска повреждения оборудования. В результате может быть определена область параметров, в пределах которой предлагаемый способ обеспечивает требуемое качество проволоки при допустимых силовых и энергетических нагрузках.

Таким образом, моделирование в данном исследовании выполняет не вспомогательную, а обосновывающую функцию: оно используется для предварительной проверки технического решения, связанного с совмещением фильерного и бесфильерного способов волочения.

При формировании математического описания необходимо обеспечить соответствие модели реальным физическим процессам, происходящим в технологической системе. Для этого используются положения теории подобия, позволяющие установить взаимосвязи между параметрами модели и исследуемого объекта [3, 4-10].

На основании сформированной информационной структуры разрабатывается обобщенная математическая модель волочильного процесса. Она должна обеспечивать возможность исследования нескольких вариантов функционирования оборудования — от исходного состояния до режима работы после введения дополнительного растягивающего воздействия.

В общем виде последовательность формирования модели можно представить следующим образом:



Такой подход позволяет использовать единую модель для сопоставления существующей и модернизированной технологических схем и определить влияние изменения условий волочения на основные показатели процесса.

Полученная виртуальная модель является исходной основой для дальнейшего математического моделирования и определения рациональных параметров ресурсосберегающего режима волочения.

$$
\begin{aligned}
&W(z,t,T) = f_{11}(z) f_2(T)\\
&W(z,t,T) = f_{12}(z) f_2(T)\\
&f(z) = \frac{dp}{dl} qS(l-z)\\
&f = ES\frac{du}{dz}\\
&N = \sum_{v=0}^{m} \frac{dp}{dl}\frac{dv}{dt}\\
&f(t) = \sum_{n=1}^{m} d_m dt\\
&\Omega = (0 \prec z \prec l, 0 \prec r \prec r_0, 0 \prec t \prec t_0); T(r,z,0) = T_0(z,r) \in \Omega
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Выводы. В результате проведенного исследования рассмотрен подход к совершенствованию процесса волочения проволоки, основанный на совмещении фильерного и бесфильерного деформирования [10 -19]. Показано, что изменение характера распределения деформации между отдельными участками технологической системы позволяет рассматривать волочение не только как последовательность операций формообразования, но и как управляемый силовой процесс, параметры которого могут быть оптимизированы с учетом условий работы оборудования и волочильного инструмента.

Сформирована информационная модель технологического процесса, отражающая взаимосвязь между геометрическими характеристиками заготовки, свойствами деформируемого материала, условиями контактного взаимодействия, силовыми параметрами и скоростью волочения. В качестве ключевых выходных характеристик определены сила волочения, частная вытяжка, промежуточный диаметр проволоки, коэффициент относительного опережения и скорость перемещения металла.

Разработанный подход позволяет перейти от качественного анализа физических явлений, сопровождающих волочение, к формализованному исследованию параметров технологической системы. На основе информационной модели сформирована предпосылка для построения обобщенной математической модели, применимой к анализу как существующей, так и модернизированной конструкции волочильной машины.

Показано, что моделирование целесообразно использовать как предварительный этап оценки технического решения, предусматривающего введение дополнительного растягивающего воздействия после чистовой волоки. Такой подход дает возможность исследовать перераспределение силовых нагрузок и определить допустимые области изменения технологических параметров без проведения первоначальных экспериментов непосредственно на промышленном оборудовании.

Практическая значимость предложенного подхода заключается в возможности его использования при выборе рациональных режимов волочения,

обосновании конструктивной модернизации оборудования и снижении эксплуатационной нагрузки на дорогостоящий волочильный инструмент. Полученная модель может служить основой для дальнейшего исследования энергетических характеристик процесса и количественной оценки ресурсо- и энергосберегающего эффекта предлагаемого способа волочения.

Список литературы:

1. Патент РУз на полезную модель № FAR 00659 от 22.07.10 г. «Волочильная машина».
2. Л.А.Красильников, А.Г. Лысенко. Волочильщик проволоки. Металлургия, 1987.
3. Avitzur B. Analysis of wire drawing and extrusion through conical dies of small cone angle // *Journal of Engineering for Industry*. — 1963. — Vol. 85. — P. 89–96.
4. Avitzur B. *Metal Forming: Processes and Analysis*. — New York: McGraw-Hill, 1968.
5. Wistreich J.G. Investigation of the Mechanics of Wire Drawing // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. — 1955. — Vol. 169.
6. Hosford W.F., Caddell R.M. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. — Cambridge: Cambridge University Press, 2007. — 331 p.
7. Schuler GmbH. *Metal Forming Handbook*. — Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. — 568 p.
8. Cristescu N.D. Fast Material Working: Wire Drawing // *Advanced Methods in Material Forming*. — Springer, 2007. — P. 199–214.
9. Haddi A., Imad A., Vega G. On the Analysis of Die Wear in Wire-Drawing Process // *Tribology Transactions*. — 2012. — Vol. 55, No. 4. — P. 466–472. — DOI: 10.1080/10402004.2012.671451.
10. Felder E., Montmitonnet P. Identification of the work of plastic deformation and the friction shear stress in wire drawing // *Wear*. — 2012. — Vol. 286–287. — P. 27–34. — DOI: 10.1016/j.wear.2011.05.029.

11. Moon C., Kim N. Analysis of wire-drawing process with friction and thermal conditions obtained by inverse engineering // *Journal of Mechanical Science and Technology*. — 2012. — Vol. 26. — P. 2903–2911. — DOI: 10.1007/s12206-012-0711-1.

12. Kim T.H., Kim B.M., Choi J.C. Prediction of die wear in the wire-drawing process // *Journal of Materials Processing Technology*. — 1997. — Vol. 65, Issues 1–3. — P. 11–17. — DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02235-2.

13. Golis B., Galkin S., et al. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing // *Materials & Design*. — 2009. — Vol. 30, No. 8. — P. 3308–3312. — DOI: 10.1016/j.matdes.2008.12.006.

14. Tiernan P., Hillery M.T. Dieless wire drawing – an experimental and numerical analysis // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2004. — Vol. 155–156. — P. 1178–1183. — DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.175.

15. Huh H., et al. Dieless drawing steel wires using a dielectric heating method and modeling the process dynamics // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2010. — Vol. 210. — P. 1702–1708. — DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.020.

16. Marković B., et al. Experimental Determination and Calculation of the Wire Drawing Force in Monolithic Dies on Straight-Line Drawing Machines // *Machines*. — 2023. — Vol. 11, No. 2. — Article 252.

17. Larsson J., et al. Experimental and theoretical examination and development of methods to calculate required pull force in wire drawing // *Heliyon*. — 2024. — Vol. 10, No. 22. — Article e39867. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e39867.

18. The Influence of Temperature in the Wire Drawing Process on the Wear of Drawing Dies // *Materials*. — 2024. — Vol. 17, No. 20. — Article 4949. — DOI: 10.3390/ma17204949.

19. Friction and Wear of Tungsten Carbide Dies in the Dry Drawing of Steel Wire // *Materials*. — 2025. — Vol. 18, No. 7. — Article 1409. — DOI: 10.3390/ma18071409.