

УДК 621.78.012: 517:946.9

АНАЛИЗ СПОСОБОВ НАГРЕВА ПРОВОЛОКИ СОВМЕСТНО С ПРОЦЕССОМ ВОЛОЧЕНИЯ**Е. О. Хребтов**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: 34092@ukr.net

Выполнен сравнительный анализ способов нагрева движущейся проволоки с целью увеличения ее пластичности во время волочения. Проведено сравнение энергозатрат при создании одного и того же температурного распределения прямым пропусканием электрического тока через движущуюся проволоку и нагревом ее в проходной муфельной печи. Расчет параметров нагрева каждого способа выполнялся с помощью соответствующей математической модели, построенной на основе краевой задачи для уравнения теплопроводности. Для подтверждения адекватности математической модели проведены экспериментальные измерения температуры в нескольких точках зоны нагрева. Проведены расчеты параметров нагрева проволоки импульсным током, позволяющие создать во время волочения электропластический эффект. Результаты исследования подтверждают целесообразность применения импульсного тока для повышения пластичности проволоки во время волочения.

Ключевые слова: волочение, электроконтактный нагрев, нагрев в электропечи, электропластический эффект, математическая модель нагрева.

АНАЛІЗ СПОСОБІВ НАГРІВАННЯ ДРОТУ ОДНОЧАСНО З ПРОЦЕСОМ ВОЛОЧІННЯ**Є. О. Хребтов**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, г. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: 34092@ukr.net

Виконано порівняльний аналіз способів нагріву рухомого дроту з метою збільшення його пластичності під час волочіння. Проведено порівняння енерговитрат при створенні одного й того ж температурного розподілу прямим пропусканням електричного струму через рухомий дріт і нагріванням його у прохідній муфельній печі. Розрахунок параметрів нагріву кожного способу виконувався за допомогою відповідної математичної моделі, побудованої на основі крайової задачі для рівняння теплопровідності. Для підтвердження адекватності математичної моделі проведені експериментальні вимірювання температури у кількох точках зони нагріву. Проведені розрахунки параметрів нагріву дроту імпульсним струмом, які дозволяють створити під час волочіння, електропластичний ефект. Результати дослідження підтверджують доцільність застосування імпульсного струму для підвищення пластичності дроту під час волочіння.

Ключові слова: волочіння, електроконтактний нагрів, нагрів у електропечі, електропластичний ефект, математична модель.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Повышение пластичности тугоплавких и трудноформируемых металлов во время волочения осуществляется за счет нагрева обрабатываемого металла. Нагрев осуществляется как прямым воздействием электрического тока на обрабатываемый материал, так и косвенным в проходной муфельной или газовой печи [1–3]. Процессы пластической деформации, в которых используется косвенный нагрев для повышения пластичности во время обработки, трудно поддаются управлению.

Исследования, проводимые в последние десятилетия в области обработки металлов давлением, предлагают варианты усовершенствования процесса волочения проволоки путем модернизации и автоматизации волочильного оборудования, а также технологии увеличения пластичности [4–6]. Тенденции модернизации технологии, в частности, заключаются в реализации электропластического эффекта (ЭПЭ) в процессе волочения, суть которого состоит в воздействии импульсным током большой плотности и частоты в зоне деформации на металл [4–6]. Это, в свою очередь, приводит к снижению усилия деформации металла, а также к улучшению качества конечной продукции. Анализируя работы [5–8], относящиеся к процессам электропластического волочения, можно сделать вывод, что вопросы реализации электропластического эффекта в про-

цессе волочения металла, достаточно теоретически изучены и освещены в научной литературе [4–8]. Приведено значительно количество примеров способов реализации электропластического волочения (ЭПВ) металлов [5–7].

Опираясь на выше перечисленные работы и проведенные исследования, можно предположить, что дальнейшая модернизация волочильного оборудования, для производства тугоплавкой и труднодеформируемой проволоки с ЭПЭ возможна с привлечением математических моделей и средств современной автоматики.

Данная разработка не требует изменения электромеханической системы волочильного стана, а лишь применения дополнительно оборудования позволяющего контролировать и управлять параметрами ЭПВ. Реализация процесса ЭПВ позволяет снизить энергоемкость производства, а технология позволяет уменьшить вероятность обрыва проволоки, а также получать продукцию, обладающую улучшенными физико-механическими свойствами.

Целью данной работы является сравнение энергозатрат при использовании различных видов нагрева перед и во время пластической деформации металла.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Работы проводились на однократном волочильном стане МВ–1000В, который является достаточно

распространённым при волочении тугоплавкой проволоки диаметром $d=10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ м [9].

При волочении вольфрамовой проволоки по существующей технологии необходим нагрев, как проволоки, так и фильеры. На стане МВ–1000В эта температура составляет около 800 °С, т.к. при меньшей температуре волочения из-за отсутствия достаточной пластичности возрастают обрывы проволоки. Нагрев проволоки в потоке с процессом волочения до необходимой температуры на стане происходит в проходной электропечи.

Для сравнения энергозатрат проведен расчет температурных полей с разными условиями нагрева во время волочения, а также проведены измерения температуры, и обработаны экспериментальные данные при косвенном нагреве проходной печи и нагреве электрическим током. Контроль температуры проводился с помощью комплекса «АПИР–С», который предназначен для бесконтактного измерения радиационной и яркостной температуры нагретых тел. Его характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры комплекса бесконтактного измерения АПИР–С

Первичный пирометрический преобразователь				Предел погрешности пирометрического преобразователя при E=1,0 %	
Тип, модификация	Диапазон измерения, °С	Обозначение градуировочной характеристики	Показатель визирования	По цифровому табло	По аналоговому выходу
ПЧД–131–03	450–750	ДК–13	1:50	0,5	1
Вторичный измерительный преобразователь					
Тип первичного преобразователя	Тип первичного преобразователя	Время установления показаний, с	Выходной сигнал		
ПВ–6213	ПЧД	0,05	0–10 В, 0–100 мВ, 0–5 А		

Нагрев проволоки в электропечи. Данный метод позволяет производить заправку проволоки в машину, не выключая печи, вести процесс волочения с заданной температурой нагрева. Фильеры нагреваются общим нагревателем, смонтированным в корпусе держателя фильеры. Используемый метод имеет ряд существенных недостатков: большая инерционность системы, перегрев проволоки в печи. При этом электропечь должна предварительно нагреться, что требует времени, и в дальнейшем не выключаться вплоть до окончательного прекращения работы на данном стане. Это влечет за собой достаточно нерациональное потребление энергии. Математическая модель квазистационарного температурного поля при нагреве движущейся проволоки в муфельной или газовой печи имеет вид краевой задачи для уравнения теплопроводности в области $\Omega \in \{(z, r) | 0 < z < l, 0 < r < r_0\}$ [10]

$$\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - vcp_n \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$T(r, 0) = T_0, T(r, l) = T_1 \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \left. \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \alpha (T - T_c) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4) \quad (3)$$

Решение задачи (1)–(3) имеет вид [11]

$$u(z) = C_1 + C_2 e^{\frac{vcp_n z}{\lambda}} + \frac{\varpi_1 z}{r_0 vcp_n} + \frac{2z(\lambda \varpi_1 + vcp_n \varpi_2)}{r_0 (vcp_n)^2} \quad (4)$$

где $\varpi_1, \varpi_2, C_1, C_2$ – постоянные.

Для проверки адекватности результатов математического моделирования (1)–(4), было проведено сравнение, расчётных и экспериментальных значений температуры. Экспериментальные значения температуры определялись в тех же точках зоны нагрева, что и расчётные.

График изменения температурного поля проволоки, показан на рис. 1.

Экспериментальные значения параметров процесса нагрева проволоки в электропечи, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Параметры нагрева электропечи

Диаметр d, м	Скорость v, м/с	Ток I, А	Напряжение U, В	Длина зоны нагрева l, м	Температура проволоки на выходе T, К
$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$	0,16	110...135	11...14	0,75	1094

Электроконтактный нагрев осуществляется путем подведения электрического тока к участку проволоки с помощью токоподводящих контактов, подключенных непосредственно к источнику питания. Данный способ повышения пластичности по-

зволяет нагревать обрабатываемый материал перед пластической деформацией и автоматизировать процесс нагрева проволоки. В отличие от косвенного нагрева в электрической печи, электроконтактный нагрев более сложный в реализации, но намно-

го практичней и экономичней в использовании. Существенный недостаток электроконтактного нагрева – сложность подвода тока к обрабатываемой проволоке. Также возникает вопрос износа движущихся токоподводящих контактов из-за сопутствующего нагрева вместе с нагреваемой проволокой.

С математической точки зрения температурное поле движущейся проволоки можно рассматривать как температурное поле движущейся осесимметричной изотропной среды с источниками тепла, действующими внутри области. Внутренние источники тепла порождаются действием электрического тока в зоне нагрева. Поэтому температурное поле в зоне нагрева движущейся среды с постоянными или периодически действующими внутренними источниками тепла, может быть определено с помощью решения начально-краевой задачи для уравнения теплопроводности в области

$$\Omega \times t \in \{(z, r, t) | 0 < z < l, 0 < r < r_0, 0 < t < t_0\} \quad [11].$$

$$\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - v c p n \frac{\partial T}{\partial z} - c p n \frac{\partial T}{\partial t} = -W(t, T) \quad (5)$$

$$T(r, z, 0) = T_0; \quad (6)$$

$$T(r, 0, t) = T_0, \quad T(r, l, t) = T_1; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = f_{li} \left[-\alpha(T - T_c) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4) \right], \quad (8)$$

где $W(t, T) = \frac{I(t)^2 \rho_0 (1 + \beta T)}{\pi^2 r_0^4}$ – источник тепла;

ρ_0, β – удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления проволоки; f_{li} – функция сигнала, характеризующая периодичность действия тока нагрева проволоки.

Решение задачи (5)–(8) получено численным методом в среде Mathcad. Полученные результаты представлены в табл. 3, а сравнение расчетных значений температуры с экспериментальными – в табл. 4.

На рис. 2 и рис. 3 изображены схемы установок прямого и косвенного нагрева проволоки.

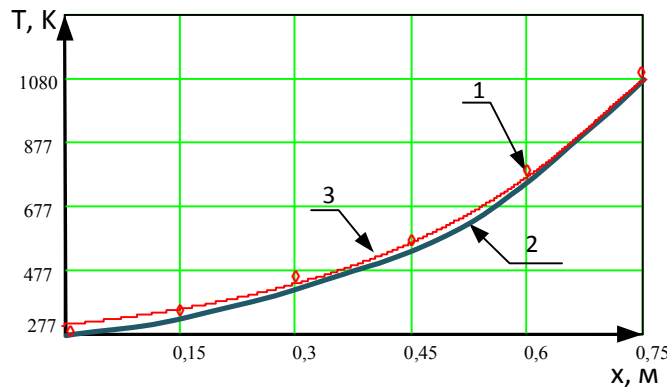


Рисунок 1 – Температурные распределения зоны нагрева вольфрамовой проволоки ($d=10^{-3}$ м): 1 – экспериментальные значения(электропечь), 2 – расчетный значения(электропечь), 3 – расчетные значения (электроконтактный нагрев)

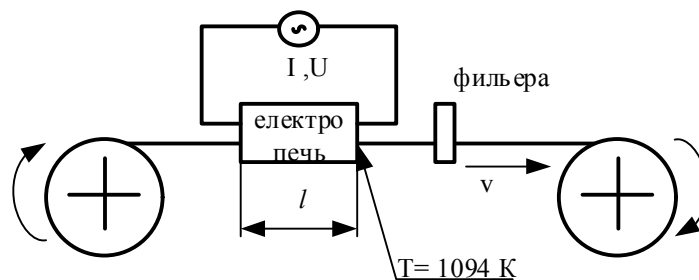


Рисунок 2 – Схема установки при нагреве проволоки в электропечи

Таблица 3 – Расчетные параметры электроконтактного нагрева проволоки

Диаметр d, м	Скорость v, м/с	Ток I, А	Напряжение U, В	Длина зоны нагрева l, м	Температура проволоки на выходе, T, К
$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$	0,16	115...35	до 13	0,75	1085

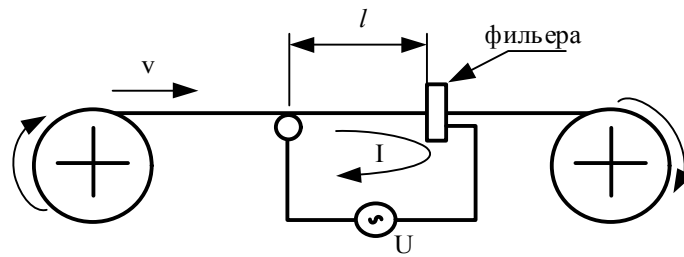


Рисунок 3 – Схема установки при использовании электроконтактного нагрева проволоки

Таблица 4 – Сравнение расчетных значений температуры с экспериментальными

Точка измерения температуры, м	Температура экспериментальная (электропечь), К	Температура расчетная (электропечь), К	Температура расчетная (электроконтактный нагрев), К
0,15	310	300	312
0,30	475	459	164
0,45	574	560	571
0,60	702	691	697
0,75	1085	1077	1080

При волочении с применением импульсного тока в зоне деформации создается электропластический эффект ЭПЭ. Условия создания ЭПЭ при волочении вольфрамовой проволоки следующие: максимальная плотность тока $J_m = 4 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$, длительность импульса $\tau = 150\text{--}200 \text{ мкс}$, частота следования импульсов $f = 600\text{--}800 \text{ Гц}$ [4].

Диаметр обрабатываемой проволоки изменяется в пределах $d = 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Соответственно сечение меняется от $S_{\text{мин}} = 0,21 \text{ мм}^2$ до $S_{\text{макс}} = 0,785 \text{ мм}^2$. Для того, чтобы плотность тока могла составлять $J_m = 4 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$, амплитудное значение тока в

зависимости от диаметра меняется в пределах 314...84 А.

С учетом длины зоны деформации волокна, она составляет $lv = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, частота импульсов должна быть равна 840 Гц. Это необходимо для того, чтобы на каждый участок обрабатываемой давлением проволоки приходился хотя бы один импульс. При длительности импульса, $\tau = 200 \text{ мкс}$, скважность будет равна шести. Форма импульса выбрана прямоугольной. На рис. 5 изображена функциональная схема подвода тока при волочении проволоки с ЭПЭ.

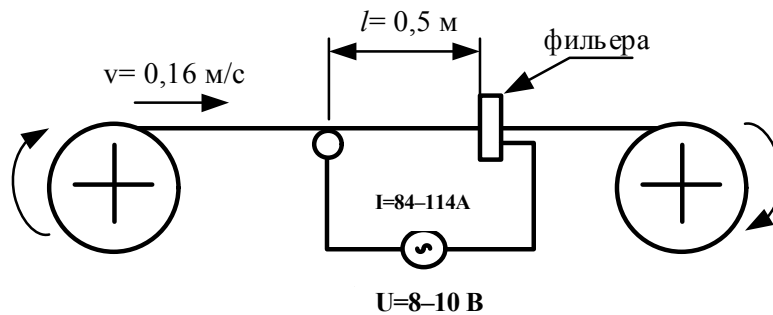


Рисунок 5 – Функциональная схема подвода тока при волочении проволоки с ЭПЭ

Для получения температурного распределения в зоне нагрева проволоки, при воздействии импульсным током, характер которого вызывает возникновения ЭПЭ, используем решение задачи (5)–(8), где f_{li} – функция импульсного сигнала (9), показана на рис. 6.

$$f_{li} = \begin{cases} I, mn \leq t \leq m + mn \cdot f \\ 0, m + mn \cdot f < t \leq mn + mn \cdot f \end{cases} \quad (9)$$

где m – длительность импульса, n – скважность, f – частота [12].

Функция импульсного тока f_{li} построена в программе Mathcad с помощью панели инструментов «Программирование».

Результат расчета температурного поля обрабатываемой проволоки при использовании ЭПЭ показан на рис. 7.

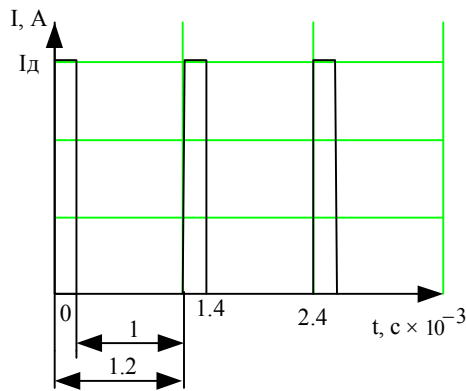


Рисунок 6 – Форма імпульсного сигналу току

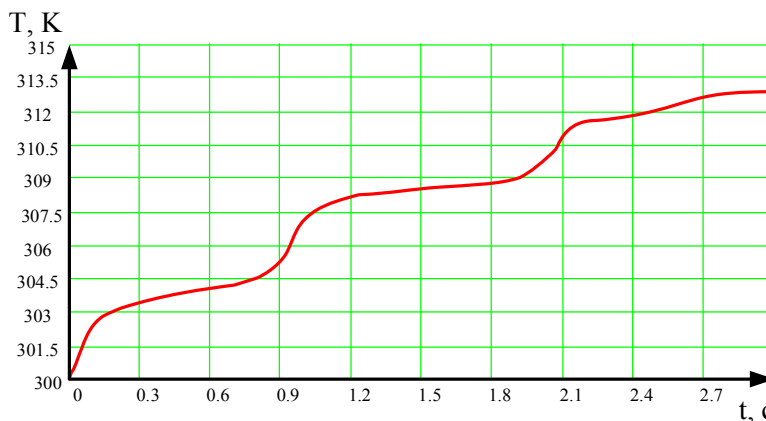


Рисунок 7 – Зміни температури вольфрамової проволочки ($d=10^{-3}$ м) в залежності від часу проходження через токопроводячі контакти при впливі ЕПЭ

При використанні технології ЕПЭ суттєво знижується температура оброблюваного матеріала, а також в рази знижується споживана потужність установки. Пластичність проволочки досягається не нагрівом, а впливом імпульсів току на локації металу. Данна технологія дозволяє при автоматизації процесу, в режимі реально часу формувати характеристики вихідного изделия, збільшити продуктивність стану. Зниження температури в зоні підводу току влічє за собою достатньо щадячий режим роботи електрокон-

тактних елементів (роликів), внаслідок чого оппадає проблема їх охолодження і преждевременного износа.

Затрачуєма потужність при використанні різних методів придання пластичності проволочки, розрахована в відповідності з результатами математичного моделювання (для електроконтактного нагріву і ЕПЭ) і снятих експериментальних даних (для електропечі). Значення затрачуємої потужності при різних варіантах обробки проволочки приведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Розрахункові параметри процесу при різних методах обробки проволочки діаметром $d=10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ м

Придання пластичності оброблюваного изделия	Затрачуєма потужність, кВт	Робоче напруга, В	Ток, А	Температура, К
Нагрів в електропечі	2,0...1,5	14...11	135...110	1080
Електроконтактний нагрів	1,5...0,4	13...9	115...35	1080
Застосування ЕПЭ	до 0,1	10...8	314...84	314

ВИВОДИ. Проведено аналіз основних способів нагріву труднодеформованих і тугоплавких металів, в частині, вольфраму, в процесі волочення. Також проведено порівняння параметрів нагріву при волоченні вольфрамової проволочки діаметром $d=10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ м. Розраховано необхідні параметри току для реалізації ЕПЭ в зоні деформації металу во время волочення.

Підтверджено цілесобразність застосування електропластичного ефекту при волоченні проволочки діаметром $d=10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ м, ввиду значно меншого збільшення температури при цьому, а також не значительних затрат електроенергії на здійснення даного процесу.

Зниження споживаної потужності при імпульсному нагріві відбувається завдяки достатньо

большой скважности импульсов, а также малого времени импульса, вследствие чего, даже завышенное амплитудное значение тока, по сравнению с электроконтактным нагревом, имеет значительно меньше среднее значение потребляемого тока.

Снижение температуры в зоне подведения тока, увеличивает срок действия токопередающих элементов. Также можно отметить, что незначительное (10–15 К) увеличение температуры при ЭПЭ, с условием одного импульса на каждый участок деформации, позволяет сделать выводы, о возможном увеличении частоты импульсов, не опасаясь повышения температуры. Отпадает необходимость контролировать уровень нагрева, из-за отсутствия зависимости «температура–пластичность».

Автор выражает свою признательность профессору В.П. Ляшенко за профессиональную поддержку и ценные консультации на протяжении всей проделанной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крупин А.В., Соловьев В.Я. Пластическая деформация тугоплавких металлов. – М.: Металлургия, 1971. – 350 с.
2. Коврев Г.С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 312 с.
3. Колчин О.П., Ляшенко В.П., Шаповал А.Н. Электроконтактный нагрев прутков из тугоплавких металлов перед деформированием // Цветные металлы. – 1979. – № 6. – С. 73–75.
4. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
5. Троицкий О.А., Сташенко В.И., Рыжков В.Г., Ляшенко В.П., Кобыльская Е.Б. Электропластическое волочение и новые технологии создания облегченных проводов // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков, 2011. – Вып. 4/2011. – С. 111–117.
6. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – Т. 10, вып. 1.
7. Ляшенко В.П., Анисков А.В., Кобыльская Е.Б. Система управления процессом электропластической деформации сверхтонкой проволоки // Труды II Междунар. конф. «Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов». Серия «Фундаментальные проблемы современного материаловедения», 23–30 сентября 2013 г. – Новокузнецк, 2013. – Т. 1. – С. 81–92.
8. Влияние электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов: монография / О.А. Троицкий, В.П. Ляшенко, Е.Б. Кобыльская и др.; под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ», 2011. – 218 с.
9. Хребтов Е.О., Кулик А.И. Применение частотно регулируемого электропривода на волочильном стане МВ–1000В // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2014. – Вип. 6/2014 (89), част. 1. – С. 11–19.
10. Ляшенко В.П., Бриль Т.С. Математична модель температурного поля рухомого дроту, що нагрівається зовнішніми джерелами тепла // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 1/2012 (72). – С. 47–49.
11. Исследование влияния термической составляющей на свойства проволоки при электропластическом волочении / В.П. Ляшенко Е.Б. Кобыльская, Т.А. Григорова, О.А. Троицкий // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2011. – Вип. 4/2011 (69), част. 1. – С. 57–62.
12. Lyashenko V.P., Kobilskaaya E.B. Control of Heat Source in a Heat Conduction Problem AIP Conference Proceedings. – Sophia, Bulgaria, 2014. – № 85. – PP. 94–101.

ANALYSIS OF WAYS OF WIRE HEATING IN CONJUNCTION WITH THE DRAWING PROCESS

E. Khrebtov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine E-mail: 34092@ukr.net

It is carried out a comparative analysis of methods for heating a moving wire in order to increase its ductility during the drawing. It is made a comparison of power inputs to create the same distribution of temperature by passing a direct electric current through a moving wire and heating it in a muffle furnace. Calculation of the parameters of each heating method was performed by an appropriate mathematical model, built on the basis of a boundary value problem for the heat equation. To confirm the adequacy of the mathematical model the experimental measurements of temperature at several points of the heating zone were carried out. The calculations of the parameters of the wire heating by pulse current were made, it allows to create the electroplastic effect during the drawing. The research results prove the use of pulse current to increase the plasticity of the wire during the drawing process.

Key words: drawing, electric furnace, electroplastic effect, electric heating, mathematical model of heating.

REFERENCES

1. Krupin, A.V., Solovyev, V.Y. (1971), *Plasticheskaya deformatsiya tugoplavkih metallov* [Plastic deformation of refractory metals], Metallurgy, Moscow, Russia.
2. Kovrev, G.S., (1975), *Elektrokontaktnyy nagrev*

pri obrabotke tsvetnyih metallov [Electrocontact heating in the processing of non-ferrous metals], Metallurgy, Moscow, Russia.

3. Kolchin, O.P., Lyashenko, V.P., Shapoval, A.N. (1979), "Electrocontact heating rods of refractory metals to deformation", *Ferrous metals*, vol. 6, pp. 73–75.

4. Spitsyn, V.I., Troitsky, O.A. (1985), *Elektroplasticheskaya deformatsiya metallov* [Electro-plastic deformation of metal], Science, Moscow, Russia.

5. Troitsky, O.A., Stashenko, V.I., Ryzhkov, V.G. et al. (2011), "Electroplastic dragging and new technologies creations of the facilitated wires", *Problems of atomic science and technology (SHROUDS)*, vol. 4, pp. 111–117.

6. Troitsky, O.A., (1969), "Electromechanical effect in metals", *JETP Letters*, vol. 10, iss. 1.

7. Lyashenko, V.P., Aniskov, A.V., Kobylskaya, Ye.B. (2013), "Process control system for electroplastic deformation superfine wire", *Proceedings of the II International Conference "The impact of high-energy impacts on the structure and properties of structural materials," series "Fundamental Problems of modern materials"*, vol.1, pp. 81–92.

8. Troitsky, O.A., Lyashenko, V.P., Kobylskaya, Ye.B. (2011), *Vliyanie elektromagnitnyih poley na plas-*

tichnost i prochnost materialov: monografiya [The influence of electromagnetic fields on the ductility and strength of materials. Monograph], Publishing house "SibGIU", Novokuznetsk, Russia.

9. Khrebtov, E., Kulik, A. (2014), "Application of frequency controlled electric drive drawing machine mv–1000v", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, vol. 6 (89), pp. 11–19.

10. Lyashenko, V.P., Bryl, T. (2012), "Mathematical model of the temperature field of a moving wire, heated by external heat sources", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 1 (84), pp. 47–49.

11. Lyashenko, V.P. (2011), "Investigation of the effect of heat on the properties of the component wire in the drawing electroplastic", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 4 (69), pp. 57–62.

12. Lyashenko, V., Kobylskaya, E. (2014), "Control of heat source in a heat conduction problem", *Proceedings of AIP Conference*, Sophia, Bulgaria, November 2–3, vol. 85, pp. 94–101.

Стаття надійшла 01.06.2015.