

**СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ  
ЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВОЛОЧІННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДРОТУ З  
НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ CR-MO-V СТАЛЕЙ**

Олійник Е.В.<sup>1</sup> [ORCID], Парусов Е.В.<sup>2</sup> [ORCID], Чуйко І.М.<sup>3</sup> [ORCID]

<sup>1</sup>Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, аспірант, Україна,

<sup>2</sup>Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, д.т.н.,  
старший науковий співробітник, Україна,

<sup>3</sup>Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України,  
к.т.н., старший дослідник, Україна

**Анотація.** За результатами аналізу даних промислового перероблення дослідних партій бунтового прокату з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення визначено емпіричний коефіцієнт модифікованого рівняння Туленкова-Золотнікова, який враховує фактичний хімічний склад металу та його структурний стан. Із використанням встановлених закономірностей розроблено спеціалізований модуль програмної оболонки CalcRoutes для прогнозування енергосилових параметрів процесу волочіння та механічних властивостей холоднодеформованого зварювального дроту. Це дає змогу розраховувати маршрути волочіння, визначати кінематичну схему витяжки прокату, швидкість волочіння, границю міцності сталі після проходження через кожний із осередків деформації, коефіцієнт навантаження на електродвигуни, сумарну потужність волочіння та продуктивність виробництва дроту з урахуванням фонду робочого часу. Отримані дані можуть бути використані фахівцями металовиробних підприємств під час розроблення та вдосконалення технології виготовлення дроту зварювального призначення з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей.

**Ключові слова:** бунтовий прокат, зварювальний дріт, волочіння, механічні властивості, моделювання

**Вступ.** Бунтовий прокат є переробною заготовкою, яка у подальшому піддається холодному деформуванню волочінням під час виготовлення сталевих дроту. При цьому границя міцності використовується як критерій для розрахунку необхідних тягових зусиль волочильного обладнання і попереднього оцінювання деформаційного зміцнення металу в процесі виробництва дроту.

Визначення залежності зміцнення металу від технології волочіння та створення на цих засадах інженерних методик розрахунку механічних властивостей холоднодеформованого дроту є одним з актуальних завдань металовиробного переробу. Зростання показників міцності сталей у процесі холодного деформування насамперед пов'язане з підвищенням густини дислокацій у кристалічній ґратці та механізмами протидії їхньому переміщенню. Вміст легувальних елементів чинить суттєвий вплив на ступінь закріплення дислокацій, що генеруються холодним деформуванням. Додатковим фактором впливу на процеси деформаційного зміцнення є структурний стан металу (тип і об'ємна частка структурних складників, дисперсність окремих фаз, розмір зерен тощо).

В Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України створена комп'ютерна програма CalcRoutes [1], яка дозволяє прогнозувати енергосилові параметри процесу волочіння і визначати механічні властивості переробної дротяної заготовки та готового дроту в залежності від якості вихідного прокату. Розрахунок границі міцності дроту базується на рівнянні Туленкова-Золотнікова, яке було модифіковане шляхом уведення емпіричного коефіцієнту  $k$ , що враховує хімічний склад і структурний стан сталі та, відповідно, рівень її деформаційного зміцнення під час прямого (без знеміцнювального термічного оброблення дротяної заготовки на проміжному діаметрі) холодного деформування волочінням [2]:

$$R_m^{dp} = k \cdot R_m^{np} \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (1)$$

де  $R_m^{dp}$  – границя міцності дроту, МПа;  $R_m^{np}$  – границя міцності бунтового прокату, МПа;  $k$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує хімічний склад сталі та її структурний стан;  $D$  – діаметр бунтового прокату, мм;  $d$  – діаметр дроту, мм.

Наразі база даних програми CalcRoutes дозволяє симулювати процес волочіння бунтового прокату з високовуглецевих сталей перлітного класу та низьковуглецевих нелегованих сталей з феритною структурою. Отже, актуальним завданням є доповнення існуючої бази даних відомостями про деформаційне зміцнення під час волочіння різних типів легованих сталей відповідального призначення, зокрема бунтового прокату для виготовлення

зварювального дроту з Cr-Mo-V сталей. При цьому визначення залежності коефіцієнту  $k$  для рівняння (1) від фактичного хімічного складу різних типів сталей та структурного стану бунтового прокату перед початком холодного деформування можливе лише через статистичне оцінювання результатів перероблення прокату в дріт у реальних промислових умовах.

**Мета роботи** – визначити параметри розрахункової моделі та створити спеціалізований модуль комп'ютерної програмної оболонки CalcRoutes для розроблення ефективної технології волочіння дроту зварювального призначення з Cr-Mo-V сталей.

**Матеріал і методика дослідження.** Для проведення статистичного аналізу використано результати промислового перероблення у зварювальний дріт 34 плавок (~ 3638 т) бунтового прокату діаметром 5,5 мм зі сталей Св-08ХГСМФА, Св-08ХГ2СМФ, Св-10ХГ2СМФ та їх аналогів. Бунтовий прокат піддавали холодному пластичному деформуванню до кінцевого діаметру 1,2–3,0 мм на волочильних станах різних конструкцій методом прямого волочіння без проведення додаткового рекристалізаційного відпалу дротяної заготовки на проміжному діаметрі.

Для металографічного аналізу структури прокату в стані постачання використовували оптичний мікроскоп Zeiss Axiovert 200M MAT (Німеччина). Границю міцності металу визначали на натурних зразках (без механічного оброблення) відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019 на розривних машинах Р-20М2 (Україна), Instron TTDM-5004 (США), Amsler 1033 (Німеччина). Механічним випробуванням піддавали контрольні зразки, що були відібрані від бунтового прокату, дротяної заготовки проміжних діаметрів та готового зварювального дроту. Розрахункове моделювання та статистичне оброблення експериментальних даних (регресійний аналіз) проводили з використанням персонального комп'ютера із залученням програмних пакетів Microsoft Excel та OriginPro.

**Результати.** Статистична характеристика контрольних показників якості досліджуваних плавок бунтового прокату наведена у таблиці.

Таблиця 1

Показники якості бунтового прокату в стані постачання

Найменування показника								
Вуглецевий еквівалент* (C <sub>e</sub> ), % ваг.			Границя міцності прокату (R <sub>m</sub> <sup>np</sup> ), МПа			Кількість бейнітно-мартенситних структур, % об.		
мін.	макс.	середнє	мін.	макс.	середнє	мін.	макс.	середнє
0,211	0,299	0,260	455	764	614	3	24	9
Примітка: *C <sub>e</sub> = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B, де вміст хімічних елементів виражено у % ваг.								

За результатами моделювання встановлено, що для низьковуглецевих сталей (C ≤ 0,15 %) з додатковим легуванням Cr (0,70–1,30 %), Mn (0,70–1,60 %), Si (0,20–0,80 %), Mo (0,50–1,30 %) і V (0,10–0,30 %), що мають феритну матрицю з різною об'ємною часткою бейнітно-мартенситних структур, коефіцієнт *k* для рівняння (1) відповідає інтервалу значень 1,14–1,21, при цьому коефіцієнт множинної кореляції *R* = 0,87.

На засадах отриманих закономірностей розроблено новий програмний модуль (рисунок), який дозволяє розраховувати раціональні маршрути волочіння й енергосилові параметри деформування, а також прогнозувати рівень міцності холоднодеформованого зварювального дроту або проміжної дротяної заготовки із низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей в залежності від показників якості прокату в стані постачання.

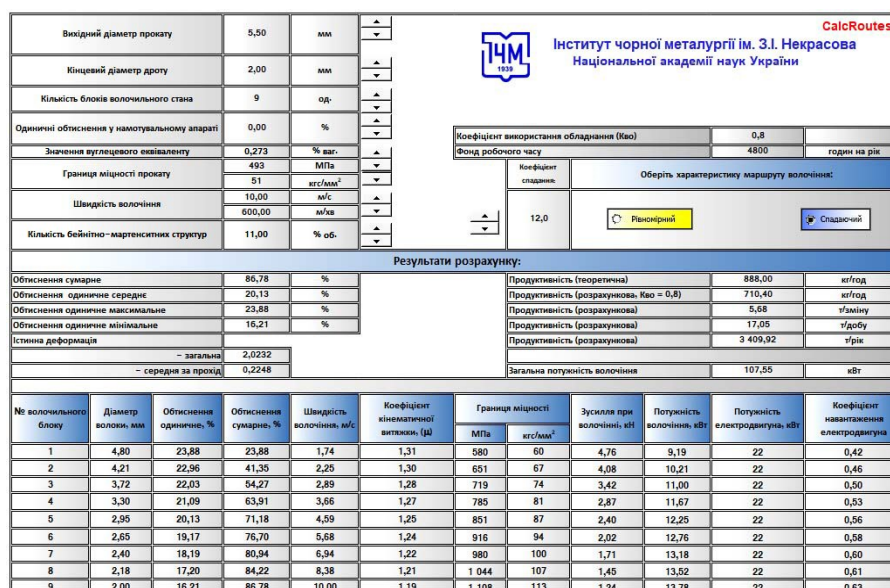


Рисунок 1 – Робоче вікно комп'ютерної програми CalcRoutes

У якості вихідних даних у програмній оболонці використовують діаметри прокату і дроту, границю міцності металу в стані постачання, кількість осередків деформації (блоків волочильного стана), інтегральний показник хімічного складу сталі (вуглецевий еквівалент), структурний параметр прокату (об'ємна частка бейнітно-мартенситних структур у феритній матриці) та потужність електродвигунів.

**Висновки.** За результатами промислових випробувань із використанням методів розрахункового моделювання та статистичного оброблення масиву експериментальних даних створено спеціалізований модуль програмної оболонки CalcRoutes, який дозволяє в автоматичному режимі проводити побудову ефективних маршрутів волочіння прокату, визначати границю міцності сталі після кожного з осередків деформації, навантаження на електродвигуни, сумарну потужність волочіння та продуктивність виробничого процесу під час виготовлення холоднодеформованого дроту зварювального призначення з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей.

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. Парусов Е. В. Прогнозування енергосилових параметрів волочіння та механічних властивостей холоднодеформованого дроту з високовуглецевих сталей. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні : матер. X міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпро, 27-29 березня 2018 р. Дніпро : НМетАУ, 2018. С. 31.
2. Парусов Е. В., Чуйко І. М., Олійник Е. В., Парусов О. В. Аналіз тенденцій та проблем виробництва прокату і дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2024. Вип. 38. С. 431–454. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>

## **DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TOOL FOR THE DESIGN OF AN EFFICIENT DRAWING PROCESS FOR WELDING WIRE MADE OF LOW-CARBON CR-MO-V STEELS**

Eduard Oliinyk, Eduard Parusov, Ihor Chuiko

**Abstract.** *Based on the analysis of data from the industrial processing of experimental batches of wire rod made of low-carbon Cr-Mo-V steels intended for the production of welding wire, an empirical coefficient of the modified Tulenkov-Zolotnikov equation was determined that takes into account the actual chemical composition of the metal and its*

*structural state. Using the established relationships, a specialized module of the CalcRoutes software package was developed for predicting the energy-force parameters of drawing and the mechanical properties of cold-deformed welding wire. This makes it possible to calculate drawing routes, determine the kinematic scheme of wire rod elongation, drawing speeds, the ultimate tensile strength of the steel after passing through each deformation zone, the load factor of electric motors, the total drawing power, and wire production capacity taking into account the available working time fund. The obtained data can be used by specialists of hardware plants during the development and improvement of the technology for producing welding wire from low-carbon Cr-Mo-V steels.*

**Keywords:** *wire rod, welding wire, drawing, mechanical properties, modeling*

#### **REFERENCE**

1. Parusov E. V. Prohnozuvannia enerhosylovykh parametriv volochinnia ta mekhanichnykh vlastyvostei kholodnodeformovanoho drotu z vysokovuhletsevykh stalei. Informatsiini tekhnolihii v metalurhii ta mashynobuduvanni : mater. X intern. sci. tech. conf., Dnipro, March 27-29, 2018. Dnipro : NMetAU, 2018. P. 31. [in Ukrainian].
2. Parusov E. V., Chuiko I. M., Oliinyk E. V., Parusov O. V. Analiz tendentsii ta problem vyrobnytstva prokatu i drotu z nyzkovuhletsevykh Cr-Mo-V stalei zvariuvalnoho pryznachennia. Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii. 2024. Vol. 38. P. 431–454. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>