

Таратута Костянтин Васильович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-6671-9670

Бондаренко Юлія Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-3978-1604

Явтушенко Ганна Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-1112-5426

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВОЛОЧІННЯ ДРОТУ ЧЕРЕЗ ПОДВІЙНІ ВОЛОКИ

Робота присвячена процесу визначення напруження волочіння дроту, при його протягуванні через подвійні волокни розташовані послідовно, без проміжних накопичувальних пристроїв. При виробництві дроту малого перерізу способом холодного волочіння спостерігається значний знос волочильних волок (філь'єр). Це призводить до відхилень готового профілю, як за формою так і за розмірами. У зв'язку з цим потрібно удосконалювати технологію волочіння, за рахунок застосування засобів зменшення зносу філь'єр. Для зменшення зносу волок необхідно враховувати як технічні так і технологічні фактори виробництва.

До основних напрямків щодо збільшення ресурсу волочильного інструменту можна віднести: використання нових зносостійких матеріалів при виробництві волок; зниження тертя у зоні деформації за рахунок використання нових мастильних матеріалів, забезпечення стабільного процесу подачі мастила, використання способів вібраційного волочіння та волочіння з протинатягом; забезпечення ефективного процесу охолодження волок; використання обладнання для якісної підготовки дроту до волочіння, удосконалення технологічних режимів волочіння.

Основне завдання дослідження спрямоване на аналіз напружено-деформаційного стану металу при волочінні дроту з протинатягом, що створюється за рахунок застосування додаткової (чорнової) волоки. Зазначені дослідження дозволять розробляти раціональні маршрути волочіння, зменшити знос волок та збільшити продуктивність процесу.

Традиційний спосіб виробництва дроту зазвичай не передбачає застосування протинатягу на чистових операціях. Виняток складає прямоточні волочильні стани працюючі з протинатягом. Протинатяг на цих волочильних станах створюється за рахунок регулювання частоти обертання тягнучих барабанів. Однак застосування протинатягу на волочильних станах інших типів дозволить суттєво вплинути на техніко-економічні показники виробництва.

Отримані у дослідженні результати показують, що застосування протинатягу при волочінні дроту створює додаткові розтягуючі напруження у металі. Створення пружних та пружно-пластичних деформацій від протинатягу дозволяє знизити стискаючі напруження в зоні тертя.

Ключові слова: волочіння, дріт, протинатяг, напруження волочіння.

Вступ. Волочіння круглого дроту є найбільш поширеним в даний час процесом, при якому заготовка за допомогою зусилля волочіння протягується через робочий канал волоки, зменшуючи свій діаметр. При цьому за рахунок зменшення розмірів поперечного перерізу дроту відбувається відповідне збільшення його довжини та швидкості руху.

Для дотримання вимог стосовно якості готового дроту та збільшення продуктивності виробництва у технології холодного волочіння досліджуються різноманітні напрямки удосконалення технологічного процесу та волочильного обладнання.

Узагальнюючі напрямки удосконалення процесу волочіння дроту можна розділити на наступні категорії: модернізація обладнання, оптимізація технологічних режимів волочіння, поліпшення мастильних матеріалів, використання нових матеріалів та покриттів для волочильного інструменту [1-3 та ін.].

Модернізація волочильного обладнання зосереджена на впровадженні сучасних волочильних станів оснащених автоматизованими системами управління та моніторингу. Це дозволяє точно контролювати силу натягу та швидкість волочіння, мінімізувати зношування волочильного інструменту, забезпечувати стабільну якість продукції [4-6].

Оптимізація технологічних режимів направлено на удосконалення технологічних параметрів, таких як кут волочіння, швидкість, ступінь обтиснення дроту. Цей напрямок дозволяє знизити внутрішні напруження у матеріалі, скоротити енерговитрати, підвищити міцність дроту [7, 8].

Поліпшення мастильних матеріалів направлено на зниження тертя між дротом та волочильним інструментом. Зазначені заходи призводять до зменшення ймовірності пошкодження поверхні, збільшують термін служби волочильного інструменту, підвищують стабільність процесу волочіння дроту. Сучасні сухі та рідкі мастила з добавками наноматеріалів демонструють високу ефективність [9 – 11].

Удосконалення волочильного інструменту за рахунок застосування збірних інструменту, або виготовлення волок з твердосплавними, алмазними та нітридними покриттями. Зазначений напрямок дозволяє зменшити знос волок, збільшити точність обробки, виготовляти дріт з різноманітних матеріалів [12- 14].

Серед зазначених напрямків удосконалення процесу волочіння окремо слід зазначити використання процесів вібраційного волочіння та використання протинатягу дроту. Ці заходи мають значний вплив на енергосилові параметри процесу волочіння та знос волочильного інструменту [15- 17].

Аналіз досліджень і публікацій. Визначення параметрів процесу волочіння дроту залишається актуальним на протязі багатьох років. Існуючі традиційні технології потребують постійного удосконалення, через нові вимоги як до якості так і до властивостей готової продукції. Основним процесом при виробництві дротів залишається процес волочіння.

У процесі волочіння зусилля витрачається на подолання [18]:

- а) сил, що витрачаються на здійснення основної пластичної деформації;
- б) сил контактного тертя у волочильному каналі;
- в) сили протинатягу;
- г) сил, які витрачаються на здійснення додаткових зрушень.

Для виведення формул, що дозволяють визначити напруження волочіння, найчастіше використовують три методи [19, 20]: метод спільного вирішення рівнянь рівноваги та пластичності, енергетичний метод, метод показників.

Найбільше формул для розрахунку напруження волочіння отримано першим методом. Вигляд і складність цих формул визначаються перш за все прийнятим при виведенні законом контактного тертя, формою поздовжнього профілю робочої зони, а також способом обліку зміцнення металу та впливу довжини зони деформації [21].

Однією з формул, яка враховує вплив напруження протинатягу, є формула Тарнавського А.Л. [22]

$$\sigma_{\text{вл}} = \sigma_T \left\{ m + q + [1 + \delta(1 - q)] \ln \mu + (1 - q) D \right\} / (1 + m),$$

$$\text{при } D = 1,6\sqrt{\ln \mu} \left(\sin \alpha \sqrt{tg \alpha} + f^2 \sqrt{ctg \alpha} \right); \quad q = \sigma_o / \sigma_T; \quad m = 4 fl_{\kappa} / d_1 \quad (1)$$

де α – кут нахилу твірної каналу волокни до осі, μ – коефіцієнт витяжки металу, f – коефіцієнт тертя, σ_o – напруження протинатягу, σ_T – середнє значення межі плинності

матеріалу у деформаційній зоні, l_k – довжина циліндричної ділянки волоки (калібруючого пояска), d_f – кінцевий діаметр дроту.

Вираз (1) включає напруження протинатягу, та враховує довжину пояска, що калібрує, і кінцевий діаметр дроту.

Формула Зикова Ю.С. [23] враховує поворот ліній струму на вході у осередок деформації та на виході металу з осередку деформації додаванням коефіцієнта $\frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha$.

У формулі (2) напруження протинатягу збільшує загальне значення напруження волочіння.

$$\sigma_{\text{вл}} = \sigma_T \left\{ \left[f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_n \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\text{ex}}}{\sigma_T} \right) + 1 \right] \ln \mu + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_n \right\} + \sigma_o, \quad (2)$$

де $\sigma_{\text{ex}} = \sigma_o + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_n \cdot \sigma_T$, α_n – приведений кут волочильного каналу.

Найбільш теоретично обґрунтованою можна вважати формулу Перліна І.Л. [18]. Вона має наступний вигляд:

$$\sigma_{\text{вл}} = \frac{1}{\cos^2 \left(\frac{\alpha + \rho}{2} \right)} \sigma_T \frac{\delta + 1}{\delta} \left[1 - \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^\delta \right] + \sigma_0 \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^\delta, \quad (3)$$

де $\alpha = \cos^2 \rho (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_n) - 1$; ρ – кут тертя; α_n – приведений кут волочильного каналу.

Для практичних розрахунків часто застосовують спрощені формули Перліна І.Л. При малих значеннях кута α_n та коефіцієнта тертя складові рівняння (3) спрощуються та набувають вигляду $\cos^2 \rho \approx 1$, $\delta = f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_n$, $\frac{1}{\cos^2 \left(\frac{\alpha + \rho}{2} \right)} \approx 1$.

У цьому випадку формула (3) набуває наступного вигляду.

$$\sigma_{\text{вл}} = \sigma_T \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_n}{f} \right) \left[1 - \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{\frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n}} \right] + \sigma_0 \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{\frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n}}. \quad (4)$$

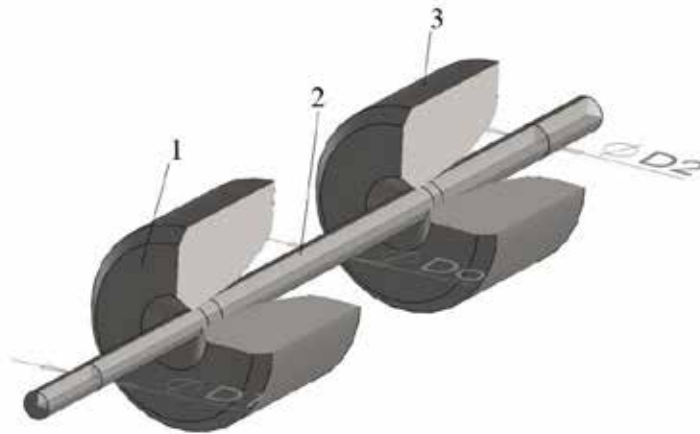
Якщо припустити, що $\left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{\frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n}} \cong 1 - \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n} \ln \frac{S_0}{S_1}$, то формула І.Л. Перліна отримає подальше спрощення.

$$\sigma_{\text{вл}} = \ln \frac{S_0}{S_1} \left[\sigma_T (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_n) + \sigma_0 \left(1 - \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n} \right) \right]. \quad (5)$$

З формули (5) видно, що при $f > \operatorname{tg} \alpha_n$, напруження протинатягу буде знижувати загальне напруження волочіння, а якщо $f < \operatorname{tg} \alpha_n$ – збільшувати. Можливий випадок, коли напруження протинатягу не впливатиме на зміну напруження волочіння. Таким чином, очевидно неоднозначний вплив напруження протинатягу на загальне напруження волочіння. Для оцінки цього впливу необхідно знати точні значення коефіцієнта тертя та кута нахилу твірної волоки. Подальше вдосконалення формул щодо визначення напруження волочіння необхідно проводити в області уточнення перерахованих вище факторів.

Результати дослідження. Нижче представлений дещо інший теоретичний підхід до оцінки впливу протинатягу при теоретичному вирішенні задачі визначення напруження волочіння.

Дослідження виконані на установці, що здійснює волочіння через дві послідовно встановлені волокна, чорнову та чистову. Причому чорнова волокна створює протинатяг у чистовій волоці. Для регулювання величини протинатягу використовувалась заготовка різного перерізу, тобто при збільшенні перерізу заготовки величина напруження протинатягу збільшується.



1 – чистова волокна (переріз), 2 – дріт, 3- чорнова волокна (переріз)

Рисунок 1 – Модель процесу волочіння дроту з протинатягом через подвійні волокна

З огляду на наявність експериментальних даних, отримаємо формули, визначення напруження волочіння через подвійні волокна, використовуючи метод спільного розв'язання спрощених рівнянь рівноваги і пластичності.

При отриманні формули зроблено такі припущення:

- а) напруження σ_x і нормальні контактні напруження p є головними напруженнями, напруження σ_x рівномірно розподілено по всій площі перерізу профілю і не залежить від координати r ;
- б) напруження контактної тертя визначається законом $\tau_x = fp$;
- в) межа плинності деформованого металу по всій довжині зони деформації постійна і дорівнює її середньому значенню σ_T ;
- г) зони позаконтактної деформації на вході у волокно та на виході з неї відсутні.
- д) чорнова та чистова волокна не з'єднані між собою.

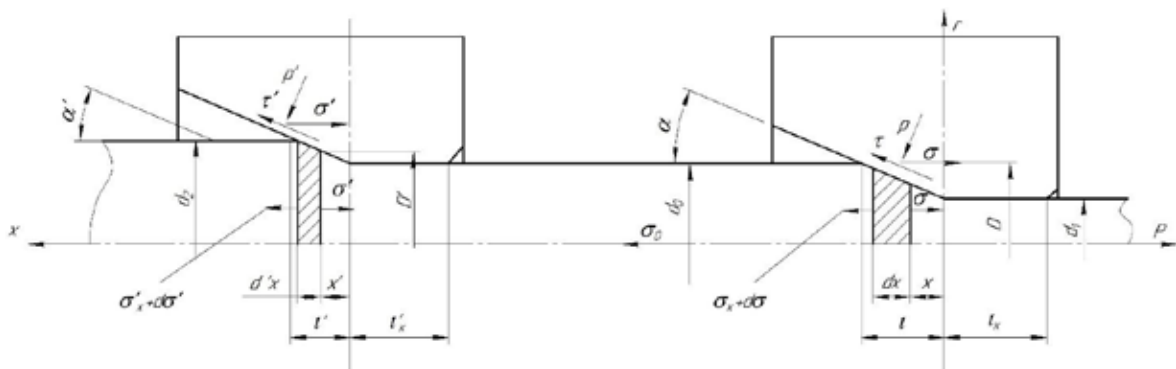


Рисунок 2 – Схема осередку деформації при волочінні дроту з протинатягом через подвійні волокна

Спочатку отримаємо рівняння напруження волочіння у чистовій волоці, враховуючі, що остання не впливає на процес волочіння у чорновій волоці.

Виділимо в осередку деформації чистової волоки (рис. 2) вертикальними перерізами на відстанях x і $x+dx$ від початку координат елемент металу довжиною dx , по бічних площях якого F_x і F_x+dF_x діють усереднені напруження розтягування σ_x і $d\sigma_x$, а по контактній поверхні – нормальні p і дотичні напруження. Диференціальне рівняння рівноваги сил, прикладених до елемента чистової волоки щодо осі волочіння, виглядає таким чином:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(F_x + dF_x) - \sigma_x F_x + p\pi D_x dx \operatorname{tg} \alpha + \tau \pi D_x dx = 0, \quad (4)$$

де D_x – діаметр перерізу на відстані x ; F_x – площа перерізу на відстані x ; dF_x – зміна площі перерізу осередку деформації чистової волоки; α – кут нахилу твірної каналу чистової волоки.

Нехтуючи через малість величини $d\sigma_x dF_x$, з урахуванням виразів $F_x = \pi D_x^2 / 4$; $dF_x = \pi D_x dD_x / 2$; $dD_x = 2dx \cdot \operatorname{tg} \alpha$; $dF_x = \pi D_x dx \cdot \operatorname{tg} \alpha$, рівняння (4) приводимо до наступного вигляду:

$$d\sigma_x + (\sigma_x + p + \tau \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \frac{dF_x}{F_x} = 0. \quad (5)$$

Приймаємо наближення $\sigma_r = -p$. Рівняння (5) включає дві невідомі σ_r і p . В якості другого рівняння застосуємо рівняння пластичності вісесиметричної задачі у спрощеному вигляді:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T, \quad (6)$$

де σ_1 , σ_3 – відповідно максимальне та мінімальне головне напруження, σ_T – межа плинності матеріалу дроту.

Прийнявши відповідно до прийнятих припущень $\sigma_1 = \sigma_x$ і $\sigma_3 = \sigma_r = -p$, $\tau_x = fp$ рівняння (5) після інтегрування набуде вигляду:

$$\ln \left(d\sigma_x - \frac{\delta + 1}{\delta} \sigma_T \right) = \delta \cdot \ln F_x + C, \quad (7)$$

де $\delta = f \cdot \operatorname{ctg} \alpha$ – коефіцієнт, що враховує вплив тертя.

Постійна інтегрування знаходиться з умов на вході в осередок деформації чистової волоки. При $x=l$, $F_x=F_0$, $\sigma_x=\sigma$ з (7) отримаємо:

$$C = \ln \left(\sigma - \frac{\delta + 1}{\delta} \sigma_T \right) - \delta \cdot \ln F_0, \quad (8)$$

де σ – горизонтальне напруження в площині входу металу в осередок деформації чистової волоки.

Після перетворень отримаємо:

$$\sigma_x = \sigma_T \frac{\delta + 1}{\delta} \left[1 - \left(\frac{F_x}{F_0} \right)^\delta \right] + \sigma \left(\frac{F_x}{F_0} \right)^\delta. \quad (9)$$

Напруження на вході у осередок деформації в чистовій волоці визначаємо з умови:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \xi = \sigma_0 \left(\frac{\sigma_{\text{вл.1}} - \sigma_{\text{вл.2}}}{\sigma_0} \right), \quad (10)$$

де $\xi = \frac{\sigma_{вл.1} - \sigma_{вл.2}}{\sigma_0}$ – коефіцієнт, що враховує зміну напруження волочіння в чистовій

волоці за рахунок протинатягу, $\sigma_{вл.1}$, $\sigma_{вл.2}$ – експериментальні значення напруження волочіння в чистовій волоці відповідно з протинатягом та за відсутності протинатягу.

Якщо $\sigma_{вл.1} < \sigma_{вл.2}$, то коефіцієнт ξ отримує негативне значення, і якщо $\sigma_{вл.1} > \sigma_{вл.2}$, то коефіцієнт ξ – величина позитивна.

Приймаючи $x=0$, $F_x=F_b$, $F_0/F_l=\mu$ і додаючи складову, що враховує напруження зрізу на вході у волоку – $\sigma_{ср.}$ [22] з виразу (9) отримуємо:

$$\sigma_{вл.1} = \sigma_T \left(\frac{\delta+1}{\delta} \right) \cdot (1 - \mu^{-\delta}) + \sigma_0 \cdot \xi \mu^{-\delta} + \sigma_{ср.}, \quad (11)$$

де $\sigma_{ср.}$ – напруження зрізу на вході у чистову волоку.

Враховуючи, що напруження протинатягу створюється чорною волокою, прийmemo:

$$\sigma_0 = \sigma' \quad (12)$$

де σ' – напруження волочіння у чорновій волоці.

Напруження волочіння у чорновій волоці визначаємо за формулою (3) при нульовому значенні останнього складника:

$$\sigma' = \frac{1}{\cos^2 \left(\frac{\alpha' + \rho'}{2} \right)} \sigma'_T \frac{\delta'+1}{\delta'} \left[1 - \left(\frac{S_2}{S_0} \right)^{\delta'} \right] \quad (13)$$

де ρ' – кут тертя у чорновій волоці; α' – кут волочильного каналу чорної волоки, $\delta' = f' \cdot \operatorname{ctg} \alpha'_n$ – коефіцієнт, що враховує вплив тертя у чорновій волоці, α'_n – приведений кут волочильного каналу чорної волоки, f' – коефіцієнт тертя у чорновій волоці, σ'_T – середнє значення межі плинності матеріалу у деформаційній зоні чорної волоки.

Напруження $\sigma_{ср.}$ що входить до (11) із [24] дорівнює $\sigma_{ср.} = 0,77 \cdot \sigma_T \cdot \operatorname{tg} \alpha$.

Якщо прийняти спрощення, рекомендоване І.Л. Перлиним [18], $\mu^{\delta} = \delta \ln \mu$, то отримаємо остаточну формулу:

$$\sigma_{вл.1} = \sigma_T \left[\delta \left(1 - \frac{\xi \cdot \sigma_0}{\sigma_T} \right) + 1 \right] \cdot \ln \mu + 0,77 \sigma_T \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sigma_0 \cdot \xi, \quad (14)$$

де $\sigma_{вл.1}$, σ_0 – відповідно напруження волочіння в чистовій волоці та напруження протинатягу; σ_T – середня межа плинності металу в осередку деформації чистової волоки.

Середня межа плинності дорівнює алгебраїчної напіврізності між величинами межі плинності металу на вході у осередок деформації та на виході.

Наявність експериментальних значень σ_T та σ_0 дозволяють з достатньою точністю визначити коефіцієнт ξ .

Частина експериментальних даних щодо впливу протинатягу на напруження волочіння в чистовій волоці представлено в табл. 1.

Висновки. Досліди показують, що напруження волочіння в чистовій волоці за відсутності протинатягу більше, ніж за наявності протинатягу, при цьому коефіцієнт ξ залишається постійним. Це можна пояснити тим, що пропорційно до збільшення протинатягу знижується напруження волочіння в чистовій волоці. Напруження волочіння знижується, якщо $\xi < 0$. Це свідчить про те, що наявність протинатягу сприяє зниженню напруження волочіння в чистовій волоці.

Таким чином, отриману теоретичну залежність для напруження волочіння, можна використовувати для розрахунку напруження волочіння з урахуванням впливу протинатягу дроту.

Таблиця 1 – Параметри процесу волочіння дроту марки БСТОМ з протинатягом у подвійних волоках

Діаметр дроту до волочіння, мм	Діаметр дроту після чорнової волоки, мм	Діаметр дроту після волочіння, мм	Коефіцієнт витяжки у чорновій волоці	Коефіцієнт витяжки у чистовій волоці	Швидкість волочіння, м/с	Межа плинності металу до та після волочіння, Н/мм ²		Середня межа плинності в осередку деформації, Н/мм ²	Напруження протинатягу, Н/мм ²	Напруження волочіння в чистовій волоці з протинатягом та без протинатягу, Н/мм ²			Коефіцієнт
d ₂	d ₀	d ₁	μ ₂	μ ₁	v	σ _{T2}	σ _{T1}	σ _T	σ ₂	σ _{вл0}	σ _{вл.1}	ζ	
2,48	2,31	1,97	1,15	1,38	0,8	418	535	477	167	226,2	291,8	-0,393	
					1,5				161,8	196,6	265,2	-0,424	
					2				157,5	178,5	253,0	-0,473	
					2,5				155,1	165,8	244,5	-0,507	
1,97	1,91	1,63	1,06	1,37	0,8	541	608	582	125,9	334,9	370,8	-0,285	
					1,5				123,0	293,7	340,0	-0,376	
					2				120,7	270,9	326,0	-0,457	
					2,5				119,9	257,2	318,1	-0,508	
1,63	1,57	1,33	1,08	1,39	0,8	641	610	631	238,3	356,1	462,4	-0,446	
					1,5				225,5	306,2	416,2	-0,488	
					2				217,1	273,5	392,1	-0,546	
					2,5				211,4	250,0	375,5	-0,594	

Бібліографічний перелік

1. Effect of Process Parameters in Copper-Wire Drawing / G. A. Santana Martinez et al. Metals. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 105. URL: <https://doi.org/10.3390/met10010105>
2. Vega G., Haddi A., Imad A. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. Materials & Design. 2009. Vol. 30, no. 8. P. 3308–3312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.12.006>
3. Simulation of a copper micro-wire drawing for electronics / A. V. Volkov et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. P. 032054. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/537/3/032054>
4. Fabrication of wire drawing machine / Nihal Kumar Dasoju et al. International Journal of Science and Research Archive. 2023. Vol. 9, no. 2. P. 123–134. URL: <https://doi.org/10.30574/ijsra.2023.9.2.0507>
5. Experimental Measurements of System Dynamics Between Two Stages of Wire Drawing Machine / G. Tasevski et al. Archive of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 62, no. 1. P. 61–72. URL: <https://doi.org/10.1515/meceng-2015-0004>
6. Experimental Determination and Calculation of the Wire Drawing Force in Monolithic Dies on Straight-Line Drawing Machines / L. V. Radionova et al. Machines. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 252. URL: <https://doi.org/10.3390/machines11020252>
7. Підвищення ефективності технологічних процесів волочіння і прокатки в умовах раціонального використання сил сухого і напіврідинного тертя під впливом зовнішніх вібрацій / Ю. Малиновський та ін. Problems of Friction and Wear. 2024. № 1(102). С. 101–125. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(102\).18434](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(102).18434)
8. Грибков Е. П., Малигін С. О., Бережна О. В. Математичне моделювання напружено-деформованого стану під час волочіння порошкового дроту з металевим сердечником. Обробка матеріалів тиском. 2024. № 1(53). С. 34–42. URL: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)34](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)34)

9. Tribological performance of modified graphene as an additive in copper wire drawing lubricant / X. Lang et al. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1108/ilt-10-2024-0399>
10. Experimental-numerical analysis to determine the efficiency of industrial lubricants in wire drawing process / T. Gomes dos Santos et al. *Revista de Metalurgia*. 2023. Vol. 59, no. 1. P. e234. URL: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.234>
11. Trukhanovich A. A., Ledneva A. A. Lubricants for dry wire drawing. *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39, no. 6. P. 510–511. URL: <https://doi.org/10.3103/s0967091209060187>
12. Tang Q. S., Yang Y. H. Fabrication and Application of CVD Diamond-Coated Copper Wire Drawing Die. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 328-330. P. 1182–1187. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.328-330.1182>
13. Lo S.-W., Lu Y.-H. Wire drawing dies with prescribed variations of strain rate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 123, no. 2. P. 212–218. URL: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00033-x](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00033-x)
14. Yang X. Friction and wear behaviors of Al_2O_3 -based ceramic composite using as wire drawing dies. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2006. Vol. 42, supp. P. 121. URL: <https://doi.org/10.3901/jme.2006.supp.121>
15. Добров И. В. Новый метод определения коэффициента трения при волочении // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 4. С. 51-54.
16. Experimental study on titanium wire drawing with ultrasonic vibration / S. Liu et al. *Ultrasonics*. 2018. Vol. 83. P. 60–67. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.08.003>
17. Ultra-fine high-carbon steel wire drawing with ultrasonic vibration / H. Cao et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 531. P. 012027. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/531/1/012027>
18. Перлин И.Л. Ерманок М.З. Теория волочения. *Металлургия*, 1971. 447 с.
19. Добров И.В., Гарнави Н.Я., Гарнави О.Н. Математическое моделирование формоизменения пластического материала в конусном калибре // *Теория и практика металлургии*, 2000. № 3.С. 53-56.
20. Ніколаєв В. О. Теорія волочіння металу. Навчальний посібник. – Запоріжжя, ЗДІА, 2000. 155с.
21. Troost Alex, Akin Okan, Boffin Reinhold. Zi ehkraft founeln beim Drahf ziehen // *Draht*. 1992. № 9. P. 732 – 735
22. Тарнавский А.Л. Эффективность волочения с противонапряжением. – М.:Металлургия, 1959. 151с.
23. Теория волочения сплошных профилей. Учебное пособие / Ю.О. Зыков. – Киев: УМК ВО, 1991. 116с.
24. G. D. S. McLellan.// *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1948, 158. № 111. P. 347-356.

References

1. Effect of Process Parameters in Copper-Wire Drawing / G. A. Santana Martinez et al. *Metals*. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 105. URL: <https://doi.org/10.3390/met10010105>
2. Vega G., Haddi A., Imad A. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. *Materials & Design*. 2009. Vol. 30, no. 8. P. 3308–3312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.12.006>
3. Simulation of a copper micro-wire drawing for electronics / A. V. Volkov et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 537. P. 032054. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/537/3/032054>
4. Fabrication of wire drawing machine / Nihal Kumar Dasoju et al. *International Journal of Science and Research Archive*. 2023. Vol. 9, no. 2. P. 123–134. URL: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.9.2.0507>
5. Experimental Measurements of System Dynamics Between Two Stages of Wire Drawing Machine / G. Tasevski et al. *Archive of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 62, no. 1. P. 61–72. URL: <https://doi.org/10.1515/meceng-2015-0004>
6. Experimental Determination and Calculation of the Wire Drawing Force in Monolithic Dies on Straight-Line Drawing Machines / L. V. Radionova et al. *Machines*. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 252. URL: <https://doi.org/10.3390/machines11020252>
7. Increasing the efficiency of drawing and rolling technological processes in conditions of rational use of dry and semi-liquid friction forces under the influence of external vibrations / Yu. Malinovsky et al. *Problems of Friction and Wear*. 2024. No. 1(102). P. 101–125. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(102\).18434](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(102).18434)

8. Gribkov E. P., Malygin S. O., Berezhna O. V. Mathematical modeling of the stress-strain state during drawing of a flux-cored wire with a metal core. *Materials Processing by Pressure*. 2024. No. 1(53). P. 34–42. URL: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)34](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)34)
9. Tribological performance of modified graphene as an additive in copper wire drawing lubricant / X. Lang et al. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1108/ilt-10-2024-0399>
10. Experimental-numerical analysis to determine the efficiency of industrial lubricants in wire drawing process / T. Gomes dos Santos et al. *Revista de Metalurgia*. 2023. Vol. 59, no. 1. P. e234. URL: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.234>
11. Trukhanovich A. A., Ledneva A. A. Lubricants for dry wire drawing. *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39, no. 6. P. 510–511. URL: <https://doi.org/10.3103/s0967091209060187>
12. Tang Q. S., Yang Y. H. Fabrication and Application of CVD Diamond-Coated Copper Wire Drawing Die. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 328-330. P. 1182–1187. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.328-330.1182>
13. Lo S.-W., Lu Y.-H. Wire drawing dies with prescribed variations of strain rate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 123, no. 2. P. 212–218. URL: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00033-x](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00033-x)
14. Yang X. Friction and wear behaviors of Al_2O_3 -based ceramic composite using as wire drawing dies. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2006. Vol. 42, supp. P. 121. URL: <https://doi.org/10.3901/jme.2006.supp.121>
15. Dobrov I. V. A New Method for Determining the Friction Coefficient in Drawing // *Metallurgical and Mining Industry*. 2000. No. 4. P. 51–54.
16. Experimental study on titanium wire drawing with ultrasonic vibration / S. Liu et al. *Ultrasonics*. 2018. Vol. 83. P. 60–67. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.08.003>
17. Ultra-fine high-carbon steel wire drawing with ultrasonic vibration / H. Cao et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 531. P. 012027. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/531/1/012027>
18. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Drawing Theory*. Metallurgy, 1971. 447 p.
19. Dobrov I.V., Garnavi N.Ya., Garnavi O.N. Mathematical modeling of plastic material shaping in a cone gauge // *Theory and practice of metallurgy*, 2000. No. 3. P. 53–56.
20. Nikolaev V. O. *Theory of metal drawing*. Textbook. – Zaporizhzhia, ZDIA, 2000. 155p.
21. Troost Alex, Akin Okan, Boffin Reinhold. Zi ehkraft founeln beim Drahf ziehen // *Draht*. 1992. № 9. P. 732 – 735
22. Tarnavsky A.L. Efficiency of drawing with counter-tension. *Metallurgy*, 1959. 151 p.
23. *Theory of drawing solid sections*. Study guide / Yu.O. Zykov. Kyiv: UMK VO, 1991. 116 p.
24. G. D. S. McLellan. // *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1948, 158. № 111. P. 347–356.

Taratuta Kostyantyn, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID 0000-0002-6671-9670

Bondarenko Yulia, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-3978-1604

Yavtushenko Hanna, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-1112-5426

DETERMINATION OF ENERGY PARAMETERS OF THE WIRE DRAWING PROCESS THROUGH DOUBLE DRAWINGS

This study focuses on determining the wire drawing tension when the wire is pulled through double dies arranged in series without any intermediate storage devices. Significant wear of the drawing dies (spindles) is observed in the production of small-section wire by cold drawing. This leads to deviations in the finished profile in terms of both shape and size. To address this issue, it is necessary to improve the drawing technology by implementing measures to reduce die wear. To achieve this, technical and technological production factors must be considered.

The main ways to increase the service life of the drawing tool are: using new wear-resistant materials to produce dies; reducing friction in the deformation zone using new lubricants and ensuring a stable lubricant supply; using vibration drawing and drawing with counter tension;

ensuring an effective cooling process for the dies; using equipment to prepare the wire for drawing; and improving the drawing process.

The main objective of this study is to analyse the stress-strain state of the metal during wire drawing with counter-tension, created by additional (rough) drawing. These studies will facilitate the development of rational drawing routes, reduce drawing wear and increase process productivity.

Traditional wire production methods usually do not involve the use of counter-tension in finishing operations. An exception is direct-flow drawing mills that operate with counter-tension. On these drawing mills, counter-tension is created by adjusting the speed of the drawing drums. However, using counter-tension on other types of drawing mill will significantly impact the technical and economic performance of production.

The results of the study show that using counter-tension during wire drawing creates additional tensile stresses in the metal. Creating elastic and elastic-plastic deformations from counter-tension reduces compressive stresses in the friction zone.

Keywords: drawing, wire, counter-tension, drawing stress.