

DOI: 10.34185/1991-7848.2024.01.05

УДК 621.778

Д.В. Коноводов, В.В. Бояркін, М.Г. Бойко, О.М. Івлєв

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ ЗОНИ КАЛІБРУВАННЯ
МОНОЛІТНОЇ ВОЛОКИ НА НЕРІВНОМІРНІСТЬ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ
ВИРОБНИЦТВІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОГО ДРОТУ**

Анотація. *Значну частину в номенклатурі метизів, що виробляються, складає дріт з низьковуглецевих марок сталей. В стандартах, за якими постачається дріт, регламентуються межі його механічних властивостей. На рівень механічних властивостей впливає нерівномірність деформації металу під час процесу волочіння. Одним з основних параметрів, який впливає на нерівномірність деформації металу є конфігурація робочого інструменту, а саме довжина робочої зони та зони калібрування. Виробники інструменту надають відповідні рекомендації з вибору довжини зони калібрування в залежності від діаметра дроту. На підприємствах, у волоках, які були зношені під час попереднього волочіння, розточують зону калібрування до необхідного розміру по діаметру. З огляду на сталість довжини волокна це призводить до зміни співвідношення між довжинами робочої зони та зони калібрування і, як наслідок, до зміни рівня нерівномірності деформації. Рівень механічних властивостей дроту визначають переважно за допомогою результатів експериментальних досліджень, що призводить до значних витрат матеріалу і енергії. В роботі з використанням комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів, досліджено вплив довжини зони калібрування на нерівномірність деформації при волочінні дроту зі сталі 1030 діаметром 1,85 мм.*

Ключові слова: *волочіння, сталь, волокна, зона калібрування, нерівномірність деформації, механічні властивості, сила*

Вступ.

Значну частку агрегатів для волочіння сталевих дротів на вітчизняних підприємствах складають багатократні стани магазинного типу (без ковзання дроту з накопиченням). Такі стани в даний час не випускаються через їх низьку

© Коноводов Д.В., Бояркін В.В., Бойко М.Г., Івлєв О.М., 2024

енергоефективність та продуктивність. Альтернативу їм складають петльові та прямоточні волочильні стани, які працюють з автоматичним регулюванням швидкостей проміжних барабанів без накопичування дроту.

Загальними недоліками сучасних машин з протинатяжінням, як петльових так і прямоточних, є слабе охолодження дроту у зв'язку з коротким часом перебування на кожному барабані, непряме охолодження дроту, барабанів та волок, значні габарити. Для розробки технології волочіння дроту тонких і найтонших діаметрів з низьковуглецевих марок сталей та прогнозування рівня механічних властивостей готового дроту, необхідно враховувати особливості зміцнення сталі при пластичній деформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Через нерівномірність деформації металу в процесі волочіння на поверхні заготовки виникають залишкові напруження розтягання, а в центральних шарах – стискаючі напруження [1]. Цей фактор необхідно враховувати, так як поверхневі напруження розтягання знижують пластичність металу і можуть бути причиною появи поверхневих тріщин. Напруження, які виникають в зоні деформації при волочінні, оказують визначальний вплив як на процес волочіння в цілому, так і на властивості отриманого дроту.

Переважно робочим інструментом для волочіння дроту є монолітні волокни. Їх виготовляють з інструментальних сталей та твердих сплавів. Волока має робочий отвір (канал), що складається з чотирьох зон: вхідної або мастильної, робочої, зони калібрування та вихідної зони. Основною зоною каналу волокни є робоча зона, де здійснюється деформація заготовки. Кут конусності робочої зони залежить від властивостей матеріалу та типу заготовки і становить 6 - 12°.

При розрахунку параметрів процесу волочіння фактичну картину для напружено-деформованого стану металу в зоні деформації значно спрощують. Зневажають зсувними напруженнями, а радіальне та поздовжнє напруження вважають головними, перше з яких мінімальне, а друге максимальне, тангенціальні напруження при цьому не беруть участь в аналізі [1,2].

В перерізі входу спостерігаються максимальні радіальні напруження, що значною мірою визначає найбільший знос волоки в цьому перерізі. По всій довжині зони деформації поздовжні напруження знижуються у напрямку від центральних шарів до периферійних. Максимальні поздовжні напруження спостерігаються в центральних шарах в перерізі виходу металу з конусної частини волоки.

На практиці часто необхідно, щоб дріт після деформації на кінцевий розмір, мав певні механічні та технологічні властивості. Тому при виборі діаметра вихідної заготовки необхідно знати не тільки початкові властивості металу (межу текучості та межу міцності), а й характер їх зміни в процесі волочіння. Складність урахування пластичних властивостей металу пояснюється тим, що важко визначити узагальнений показник пластичності металу [2]. Тому пластичні властивості визначають через відносні показники (відносне подовження, звуження шийки та інш.), які важко ввести в розрахунок маршрутів волочіння.

Для дослідження процесу волочіння дроту часто використовують математичне моделювання з використанням методу скінчених елементів [3-6].

Мета дослідження.

Метою роботи є створення математичної моделі процесу волочіння дроту з використанням методу скінчених елементів та дослідження з використанням створеної моделі впливу довжини зони калібрування волоки на нерівномірність деформації металу та параметри процесу волочіння.

Основні матеріали дослідження.

Для теоретичного дослідження механізму формозміни металу в зоні деформації при волочінні, використовувалась програма QForm UK [7]. QForm UK – це програмний комплекс для математичного моделювання на основі методу скінчених елементів різноманітних процесів обробки металів тиском і термічної обробки [8,9].

У програмному комплексі QForm UK було створено вісесиметричну модель процесу волочіння, що дозволило значно скоротити час розрахунку та обсяг даних у порівнянні з використанням тривимірної моделі.

Кут робочої зони волоки складав 12° у всіх випадках моделювання. Схема поперечного перерізу волоки представлено на рисунку 1.

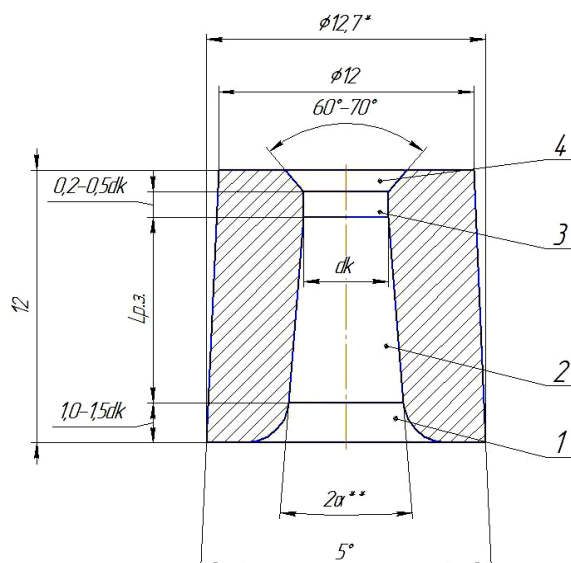


Рисунок 1 – Основні розміри волоки

1 – вхідна зона; 2 – робоча зона; 3 – зона калібрування; 4 – вихідна зона

Для опису фізичних властивостей матеріалу дроту (сталь 1030) та волоки (сталь Х12МФ) була використана база даних програмного середовища QForm UK. Реологічні властивості сталі 1030 брались також із цієї бази.

Граничні умови процесу:

- початкова температура заготовки і волоки – 20°C ;
- температура навколишнього середовища – 20°C ;
- максимальна швидкість волочіння – 12 м/с ;
- для опису напружень тертя на контакті між інструментом та заготовкою використовували змішаний закон.

- коефіцієнт зміни об'єму для заготовки - $1,0$;
- накопичений ступінь деформації для першого проходу – відсутній.

Створена модель (рис. 2) була використана для дослідження процесу волочіння дроту діаметром $1,85\text{ мм}$ з катанки діаметром $5,6\text{ мм}$. Маршрут волочіння представлений в таблиці 1.

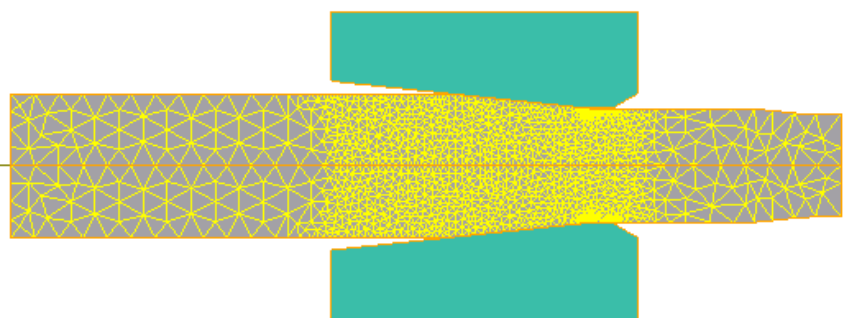


Рисунок 2 – Графічне відображення процесу волочіння

Таблиця 1

Маршрут волочіння

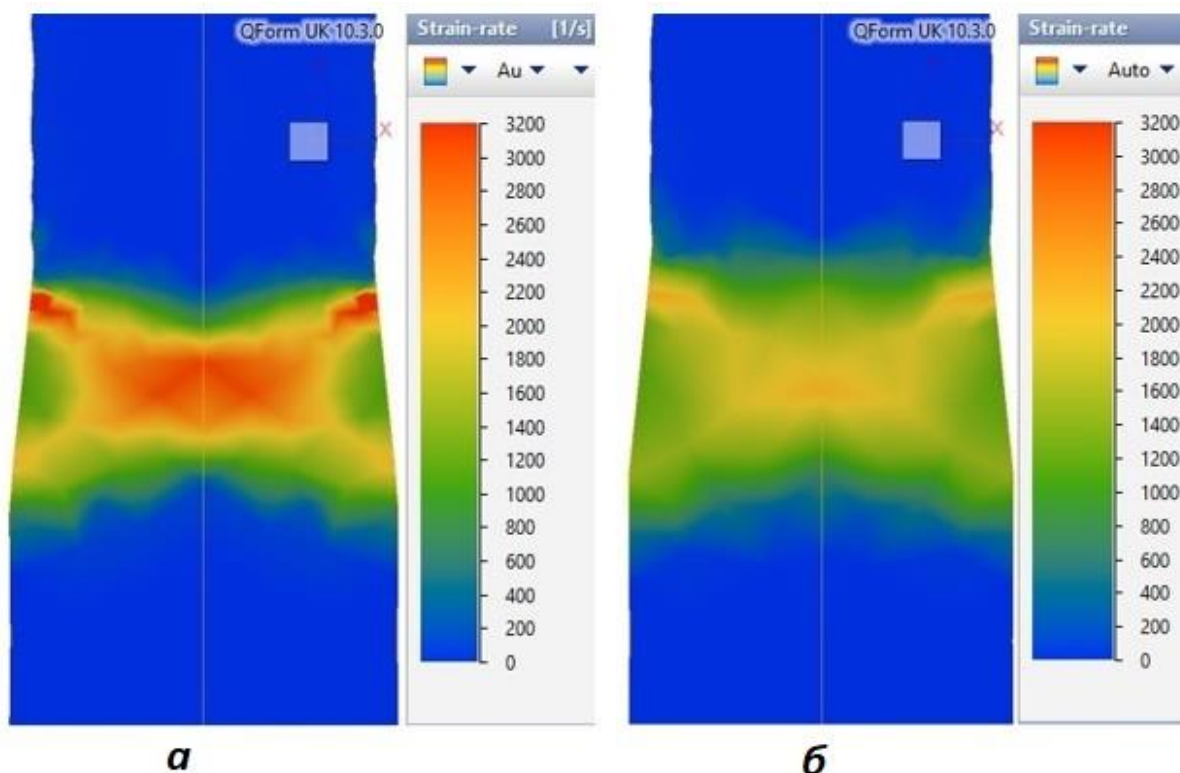
Параметри	1 секція	2 секція	3 секція	4 секція	5 секція	6 секція	7 секція
діаметр дроту, мм	4,45	3,65	3,07	2,65	2,33	2,05	1,82
обтиск по діаметру, %	36,85	32,72	29,26	25,49	22,69	22,59	21,18
сумарний обтиск по діаметру, %	27,9	57,5	69,9	77,6	82,7	86,6	89,4
частковий коефіцієнт витяжки	1,59	1,49	1,41	1,34	1,29	1,29	1,27
сумарний коефіцієнт витяжки	9,47						
швидкість волочіння, м/с	2,007	2,984	4,217	5,660	7,322	9,458	12,000

Даний маршрут має невеликі часткові витяжки, що знижує вірогідність обриву металу, ефект старіння та забезпечують кращі пластичні властивості. Однак збільшення кількості переходів волочіння та нерівномірність деформації по перерізу дроту, може впливати на механічні характеристики дроту і навіть привести до появи тріщин.

Використання великих сумарних та часткові витяжок при волочінні зменшує кількість переходів, що підвищує продуктивність процесу. Однак зростає вірогідність обривів, тому необхідною умовою є використання більш якісної заготовки, якісного мастила, якісного охолодження барабанів, дроту та волок.

З використанням створеної математичної моделі було виконано дослідження напружень в зоні деформації, температурно-швидкісних параметрів та сили волочіння для двох значень довжини зони калібрування волок $0,2d$ та $0,5d$, де d – діаметр дроту в проході. Такий діапазон значень довжини зони калібрування рекомендує постачальник робочого інструменту.

Аналіз розподілу швидкості деформації в середині зони деформації показав, що при зростанні довжини зони калібрування волоки від значення $0,2d$ до $0,5d$, нерівномірність розподілу швидкостей деформації зменшується. На рисунку 3, у якості прикладу, наведено розподіл швидкості деформації для шостого проходу при різній довжині зони калібрування.

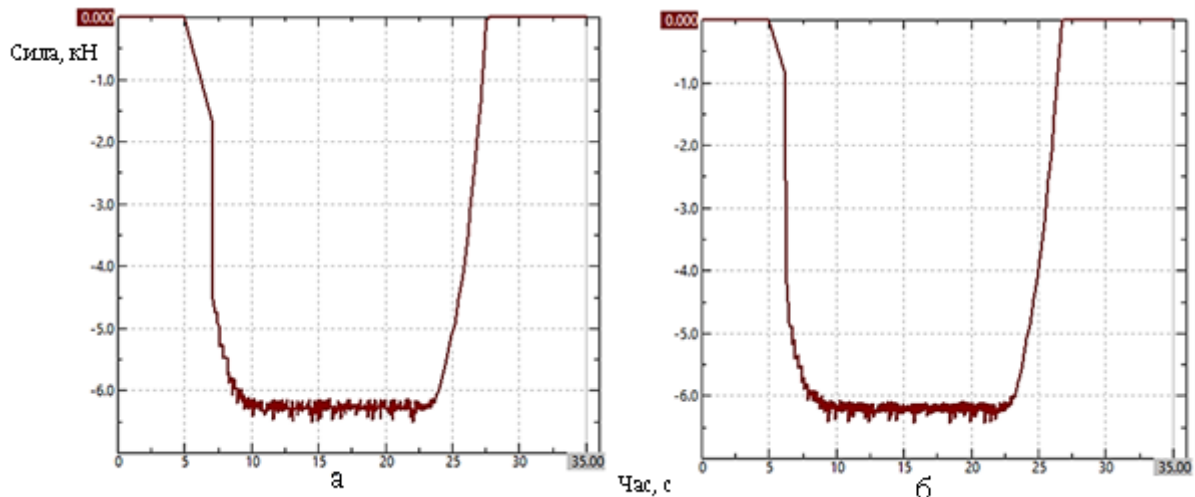


a – $lk = 0,2d$; б – $lk = 0,5d$

Рисунок 3 – Розподіл швидкості деформації у шостому проході

Як видно з рис. 3, швидкість деформації при збільшенні довжини зони калібрування зменшується за абсолютними значеннями та розподіляється більш рівномірно. Слід відзначити, що в останніх проходах, зі зменшенням діаметра дроту, вплив довжини зони калібрування на значення та розподіл швидкостей деформації зростає.

На рисунку 3 показані дані значень сили волочіння для випадку моделювання деформації у першому проході з діаметра 5,6 мм на діаметр 4,45 мм.



а – $l_k = 0,2d$; б – $l_k = 0,5d$

Рисунок 4 – Сила волочіння у першому проході

Зміна довжини зони калібрування від $0,2d$ (рис. 4, а) до $0,5d$ (рис. 4, б) істотно не впливає на силу волочіння при заданих вихідних даних та складає 6,1-6,2 кН і 6,2-6,3 кН відповідно. Теж саме спостерігається і в інших проходах, тобто сили тертя при зміні довжини зони калібрування від $0,2d$ до $0,5d$ не оказують суттєвого впливу на енергосилові параметри волочіння. Загалом дослідження по всім переходам маршруту волочіння показали, що сили тертя при зміні довжини зони калібрування від $0,2d$ до $0,5d$ збільшують значення сили волочіння до 1,6%.

Аналіз напружень та швидкостей деформації підтвердив існуючі уявлення про те, що при збільшенні довжини зони калібрування нерівномірність деформації зменшується, що зменшує ризик виникнення залишкових напружень в металі, та зменшує вірогідність появи у зовнішніх шарах дроту великих напружень розтягання. Крім того, чим довше зона калібрування, тим більш повною є деформація по перерізу волоки і тим більше знижуються радіальні напруження. Зниження рівня значень радіальних напружень

опосередковано вказує на можливе зменшення зношення волоки. Найбільший ефект впливу довжини зони калібрування помітно в останніх проходах, де найбільша нерівномірність деформації.

Висновки.

Створено математичну модель процесу багатократного волочіння дроту. Визначено, що зі збільшенням довжини зони калібрування при одночасному зменшенні довжини робочої зони волоки, спостерігається зменшення нерівномірності деформації та незначний ріст сили волочіння. Математична модель може бути використана для подальших досліджень процесу волочіння.

ЛІТЕРАТУРА

1. Данченко В.М., Гринкевич В.О., Головка О.М. Теорія процесів обробки металів тиском: підручник. Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
2. Грушко О. В., Огородніков В. А., Слободянюк Ю. О. Деформовність маловуглецевого дроту в процесі його багатоступінчастого холодного волочіння, Вісник ВПІ, вип. 3, 2019. С. 103–110.
3. Коноводов Д.В., Бояркін В. В., Бойко М.Г., Івлєв О.М. Комп’ютерне моделювання нерівномірності деформації при волочінні дроту. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ІТММ’2024: тези доп. міжнарод. конф., м. Дніпро, 10-11 квітня 2024 р. / Міністерство освіти і науки України, Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2024. С. 335 – 339. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.063
4. Ao Ma, Jiaying Cheng, Dasheng Wei, Qiang Li, Feng Fang, Zhaoxia Li. Experiments and numerical analyses on splitting fracture of wire under multi-pass drawing, Engineering Failure Analysis, Volume 134, 2022, 106035, ISSN 1350-6307. DOI:10.1016/j.engfailanal.2022.106035
5. Sergio Baragetti, Marco Giustinoni, Fabrizio Ranzhetti. Wire ropes with diamond beads for multi-wire machines optimization by means of DoE: Numerical models and choice of design parameters, Engineering Failure Analysis, Volume 143, Part A, 2023, 106826, ISSN 1350-6307. DOI:10.1016/j.engfailanal.2022.106826
6. Таратута К. В., Проценко В. М., Востоцький С. М. Комп’ютерне моделювання процесу волочіння сплавів на основі титану. IV Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси – ІМТСК-2023: тези доп. міжнарод. конф., м. Дніпро, 25-26 травня 2023 р. / Міністерство освіти і науки України, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, 2023. С. 40 – 42.
7. <https://www.qform3d.com/>
8. Nosko M., Konovodov D., Samsonenko A., Bobukh O. Determination of the Deformation Parameters of the Steel Reinforcing Phase inside the Aluminum Matrix

during Hot Rolling. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. № 6. P. 84–89. DOI:10.33271/nvngu/2022-6/084.

9. Бояркін В.В. Математичне моделювання профілювання труб квадратного поперечного перерізу / В.В. Бояркін, О.А. Ремез, О.С. Польща // *Сучасні проблеми металургії*. Наукові вісті, 2023. № 26. – С. 3-12. DOI:10.34185/1991-7848.2022.01.01

REFERENCES

1. Danchenko V.M., Hrynkevych V.O., Holovko O.M. *Teoriia protsesiv obrobky metaliv tyskom: pidruchnyk*. Dnipropetrovsk: Porohy, 2008. – 370 s.
2. Hrushko O. V., Ohorodnikov V. A., Slobodianiuk Yu. O. Deformovnist malovuhletsevoho drotu v protsesi yoho bahatostupinchastoho kholodnoho volochinnia, *Visnyk VPI*, vyp. 3, 2019. S. 103–110.
3. Konovodov D.V., Boiarkin V.V., Boiko M.H., Ivliev O.M. Computer simulation of non-uniform strain during wire drawing. *Informatsiini tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni – ITMM2024: tezy dop. mizhnarod. konf.*, m. Dnipro, 10-11 kvitnia 2024 r. / Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Ukrainyskyi derzhavnyi universytet nauky i tekhnologii, Dnipro, 2024. S. 335 – 339. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.063
4. Ao Ma, Jiaying Cheng, Dasheng Wei, Qiang Li, Feng Fang, Zhaoxia Li. Experiments and numerical analyses on splitting fracture of wire under multi-pass drawing, *Engineering Failure Analysis*, Volume 134, 2022, 106035, ISSN 1350-6307. DOI:10.1016/j.engfailanal.2022.106035
5. Sergio Baragetti, Marco Giustinoni, Fabrizio Ranghetti. Wire ropes with diamond beads for multi-wire machines optimization by means of DoE: Numerical models and choice of design parameters, *Engineering Failure Analysis*, Volume 143, Part A, 2023, 106826, ISSN 1350-6307. DOI:10.1016/j.engfailanal.2022.106826
6. Taratuta K. V., Protsenko V. M., Vostotskyi S. M. Kompiuterne modeliuвання protsesu volochinnia splaviv na osnovi tytanu. IV Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia Informatsiini modeliuiuchi tekhnologii, systemy ta komplekсы – IMTSK-2023: tezy dop. mizhnarod. konf., m. Dnipro, 25-26 travnia 2023 r. / Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Cherkaskyi natsionalnyi universytet imeni Bohdana Khmelnytskoho, Cherkasy, 2023. S. 40 – 42.
7. <https://www.qform3d.com/>
8. Nosko M., Konovodov D., Samsonenko A., Bobukh O. Determination of the Deformation Parameters of the Steel Reinforcing Phase inside the Aluminum Matrix during Hot Rolling. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. № 6. P. 84–89. DOI:10.33271/nvngu/2022-6/084.
9. Boiarkin V.V. Matematychnе modeliuвання profiliuvannya trub kvadratnoho poperechnoho pererizu / V.V. Boiarkin, O.A. Remez, O.S. Polshcha // *Suchasni problemy metalurhii*. Naukovi visti, 2023. № 26. – С. 3-12. DOI:10.34185/1991-7848.2022.01.01

Received 07.02.2024.

Accepted 11.03.2024.

UDC 621.778

D.V. Konovodov, V.V. Boiarkin, M.H. Boiko, O.M. Ivliev

INVESTIGATION OF THE MONOLITHIC DIE BEARING LENGTH ON THE NON-UNIFORM STRAIN DURING THE LOW-CARBON WIRE PRODUCTION

Low-carbon steel wire takes a large part in the production of wire products. The wire standards regulate the limits of its mechanical properties. Drawing non-uniform strain determines the mechanical properties. One of the main parameters determines the non-uniform strain is the die dimensions, specifically the length of the die bell and the length of the die bearing. Tool manufacturers provide appropriate recommendations for choosing the length of the die bearing depending on the wire diameter. In industry, the die bearing is bored to the required diameter size in worn out dies during previous drawing. Considering the constancy of the die length, this leads to a change in the ratio between the lengths of the die bell and die bearing and to a change in the level of non-uniform strain. The mechanical properties of the wire are determined mainly through the results of experimental investigations, it leads to significant costs of material and energy. In this work, using FEM computer simulation, the influence of the die bearing on the non-uniform strain while drawing 1030 steel wire with a diameter of 1.85 mm was investigated.

Keywords: drawing, steel, drawing die, die bearing, non-uniform strain, mechanical properties, force.

Конюдов Дмитро Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0001-8282-4991. E-mail: d.v.konovodov@ust.edu.ua.

Бояркін Вячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Бойко Максим Геннадійович, аспірант кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій. E-mail: dniproservice.office@ukr.net.

Івлев Олександр Михайлович, магістрант кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій. E-mail: o.m.ivliev@stud.ust.edu.ua.

Konovodov Dmytro, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State university of Science and Technologies. ORCID ID: 0000-0001-8282-4991. E-mail: d.v.konovodov@ust.edu.ua.

Boiarkin Viacheslav, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State university of Science and Technologies. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Boiko Maksym, PhD student, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State university of Science and Technologies. E-mail: dniproservice.office@ukr.net.

Ivliev Oleksandr, Master student, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State university of Science and Technologies. E-mail: o.m.ivliev@stud.ust.edu.ua.