

УДК 621.7; 621 7.043

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-2>

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ КОМБІНОВАНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПОКРАЩЕНИХ МЕХАНІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАЛОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Пашинська Олена Генріхівна,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»»
ORCID ID: 0000-0001-7102-1544

Пашинський Володимир Володимирович,

доктор технічних наук, доцент,
завідувач кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»»
ORCID ID: 0000-0003-0118-4748

Бойко Ігор Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»»
ORCID ID: 0000-0001-7742-4694

У роботі представлено результати впливу комбінованої пластичної деформації на властивості маловуглецевої сталі. Оброблення складається з гарячої прокатки та холодного волочіння, що виконується із застосуванням волок зі зсувом. Експеримент проводили для визначення оптимальних режимів обробки для отримання покращених механічних і технологічних властивостей досліджуваних сталей. Вивчення впливу волочіння зі зсувом на структуру та властивості маловуглецевої сталі здійснювалось за різного поєднання леформування у круглих волоках і волоках зі зсувом. Показано, що застосування волок зі зсувом за різних обтискань і схем волочіння впливає на механічні властивості та густину низьковуглецевого дроту. Визначено оптимальні режими волочіння, встановлено, що оптимальним є використання в разі деформації волок зі зсувом за 23% часткового обтиснення. Такий ступінь обтиснення дає мінімальний рівень падіння відносного звуження, що є одним з основних чинників отримання належної технічної деформуємості волочінням, тому з'являється можливість застосовувати таку схему волочіння дроту без використання проміжного відпалу.

Ключові слова: дріт, деформація, механічні властивості, міцність, густина, волочіння зі зсувом.

Pashynska Olena, Pashynskiy Volodymyr, Boyko Ihor. Determination of optimum regimes of combined plastic deformation for obtaining improved mechanical and technological properties of low-carbon steels

The paper presents the results of the effect of combined plastic deformation on the properties of low-carbon steel, which consists of hot rolling and cold drawing, performed using shear rolls. The experiment was performed to determine the optimal processing parameters for obtaining improved mechanical and technological properties of the studied steels. The study of the influence of shear drawing on the structure and properties of low-carbon steel was carried out with different combinations of forming in round draws and draws with shear. It is shown that the use of draws with shear with different reductions and drawing schemes affects the mechanical properties and density of low-carbon wire. The optimal drawing regimes were determined, and it was established that it is optimal to use draws with shear at 23% partial reduction. This degree of reduction gives the minimum level of decreasing in percentage reduction of area, which is one of the main factors for obtaining sufficient technical deformability by drawing, therefore it becomes possible to use such a wire drawing scheme without the use of intermediate annealing.

Key words: wire, deformation, mechanical properties, strength, density, drawing with shear.

Застосування методів комбінованої пластичної деформації нині дає можливість отримати ультрадрібнозернисту (далі – УДЗ) структуру практично в будь-якому матеріалі.

У виготовленні дроту з УДЗ-структурою одним з обмежень є той факт, що його волочіння відбувається за безперервною схемою. А типовий обсяг замовлень обчислюється за вагою

тонами, а за довжиною – десятками тисяч кілометрів. Тому проведення пластичної деформації завдяки особливим волокам зі зсувом має відбуватися у процесі волочіння без зниження продуктивності технологічного процесу. У розробленні технології волочіння зі зсувом важливу роль відіграватимуть швидкість проходження дроту через волоку, кількість проходів і схема чергування волок зі зсувом і волок стандартної круглої форми. Варіювання цих параметрів дозволить виявити зміну закономірностей структуроутворення дроту, що створить умови для оптимізації схеми деформування. Виявлення схем деформування, що підвищать механічні та технологічні властивості дроту, дозволить створити технологію волочіння низьковуглецевого дроту необхідної продуктивності.

Вирішенням питання використання нових методів інтенсивної деформації, зокрема й у волочінні, цікавляться вчені багатьох країн [1–6]. Найбільш простим із погляду реалізації є метод [5]. Так, автори розглядають вплив знакозмінного вигину на властивості холоднотягнутої арматури. Основними перевагами такого методу є безперервність і можливість використовувати для отримання довгомірних виробів із підвищеними механічними властивостями без додаткового нагріву.

Спосіб отримання УДЗ-структури на довгомірних виробках, заснований на волочінні, описаний у роботі [6]. Головна його перевага – безперервність процесу та можливість застосування для масового волочильного виробництва. Недоліком способу є трудомісткість процесу волочіння, бо використовується складний технічний вузол, що потребує зміни волокон демонтажу та нового складання.

У роботі [6] показано, що найбільш ефективно подрібнення зерен відбувається вигином дроту у процесі волочіння, чого можна домогтися, наприклад, зміною розташування волок щодо осі волочіння. Основними недоліками такої схеми є низька швидкість волочіння (0,05 м/с), складність заправки дроту під час кожного волочіння та складна система вузла з волоками, поломка якого у промисловому виробництві може значно знизити його продуктивність.

Існує велика кількість робіт [7–14], присвячених розробленню, удосконаленню різних способів термодіформацийних обробок із метою знаходження оптимальних режимів деформування. У даних роботах показано, що зміна течії металу за деформації щодо її осі призводить до позитивних змін структури та властивостей. Однак деякі з них показали також суперечливі дані щодо зміни рівня механічних властивостей, наприклад міцності. Окрім того, виявилось,

що кожна схема інтенсивної деформації має особливості впливу на процеси структуроутворення, які можна уточнювати тільки проведенням натурних експериментів.

Метою цієї статті є:

- вивчення впливу волочіння зі зсувом на структуру та фізико-механічні властивості маловуглецевої сталі за різного поєднання стандартних круглих волок і волок зі зсувом;
- визначення оптимальних режимів волочіння для отримання поліпшених механічних і технологічних властивостей;
- розроблення підходів для створення технології волочіння зі зсувом низьковуглецевого дроту, що дозволяє запобігти проміжним відпалам.

Матеріали та методика

Експеримент був проведений на маловуглецевому дроті Св08Г2С із 0,071% С і 1,98% Mg. Для досягнення поставленої мети експеримент виконувався за схемою, наведеною на рисунку 1. Для отримання зразків із різним ступенем обтискань використовували заготовку катанки після гарячої прокатки діаметром $\varnothing 6.15$. Її проволочили звичайним способом через традиційні круглі волокни $\varnothing 5.57$, $\varnothing 5.35$, $\varnothing 5.1$ мм, а потім відпалили (рисунок 1). Температура відпалу становила 650°C , витримка – 30 хвилин, охолодження проводилося на повітрі. Відпал дозволив отримати однорідну структуру на всіх діаметрах: $\varnothing 5.57$, $\varnothing 5.35$, $\varnothing 5.1$ мм. Потім ці три типорозміри проволочили через волоку зі зсувом діаметром $\varnothing 4.65$ мм. Далі кожен із 3-х отриманих зразків розділили на три частини. Кожну частину проволочили через традиційні звичайні круглі волокни $\varnothing 4.65$, $\varnothing 4.46$, $\varnothing 4.28$. Це дало дев'ять варіантів станів із різними частковими обтисканнями. Схема волочіння на переходах «кругла волока – волока зі зсувом» та «волока зі зсувом – кругла волока» показана на рисунку 1.

Механічні властивості визначали як після деформування у круглих волоках, так і після додаткової деформації у волоках зі зсувом.

Результати та їх обговорення

Дослідження показали, що за малих обтискань волокою зі зсувом (8%) міцність дроту значно збільшується: на 14% – з 985 до 1 145 Н/мм² (рисунок 2-а). Зі збільшенням ступеня обтискання волокою зі зсувом приріст міцності знижується: за обтискання 23% міцність дроту збільшується приблизно на 4% – з 1 210 до 1 240 Н/мм². Інакше кажучи, волока зі зсувом за великих обтискань призводить до меншого зміцнення дроту, ніж за менших обтискань. Це незвичне явище, бо збільшення ступеня деформації (обтискання) має приводити до більшого зростання міцності, як показано в сучасних і класичних працях [1–3; 12].



Рис. 1. Схема волочіння, у процентах наведено часткове обтиснення

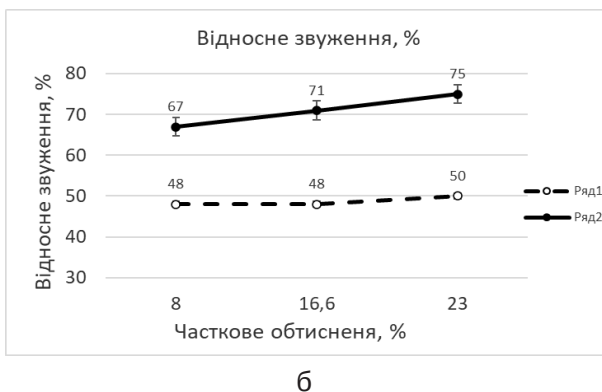
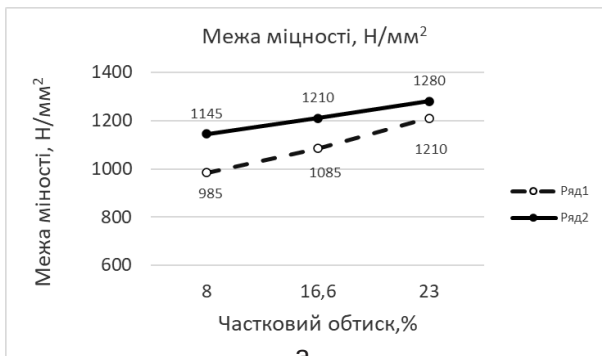
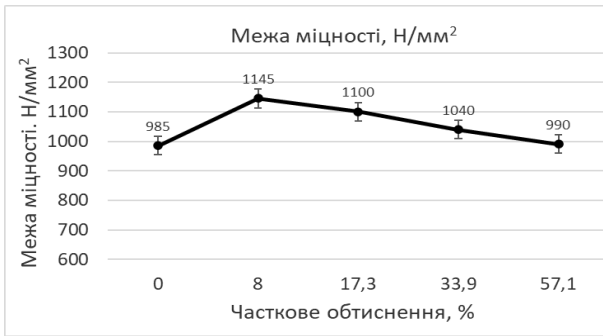


Рис. 2. Механічні властивості дроту після волочіння через круглі волюки (Ряд 1) та з додатковою деформацією у волюці зі зсувом (Ряд 2), а – межа міцності, б – відносне звуження

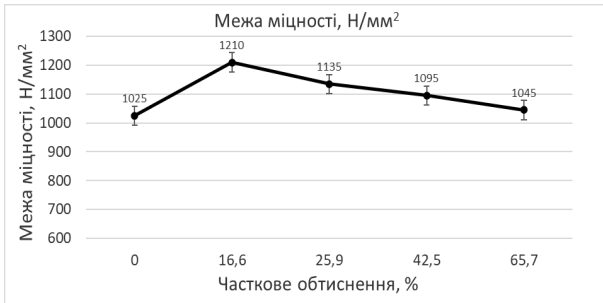
Окрім того, у разі обтискання волюками зі зсувом зі збільшенням ступеня обтиснення зростає відносне звуження, що також не є характерним явищем у традиційному волочінні [7; 14] (рисунок 2-б). Відносне звуження зі зростанням ступеня обтиснення волюкою зі зсувом суттєво збільшується (на 19–25 одиниць), чим більше обтискання волюкою зі зсувом, тим більше росте відносне звуження. Добре відомо, що відносне звуження характеризує технологічну пластичність металу. Тому підвищення відносного звуження свідчить про належну технологічну пластичність дроту під час волочіння, що дає змогу продовжити його подальше волочіння до малих діаметрів без додаткового відпалу.

Подальша поведінка механічних властивостей після волочіння з волюкою зі зсувом показана на рисунку 3.

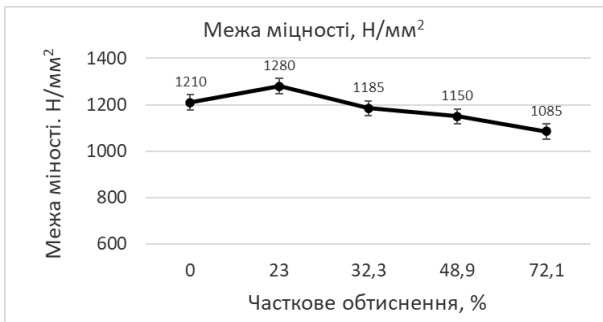
Як видно, зі збільшенням ступеня обтиснення волюкою зі зсувом спостерігається тенденція росту межи міцності, але під час подальшого звичайного волочіння ми спостерігаємо зменшення значень міцності з ростом ступеня деформації. Не важко помітити, що обтискання у 23% волюкою зі зсувом є оптимальним під час волочіння, бо воно дає найменший приріст міцності. Проте результати механічних випробувань не дають нам повного уявлення про процеси, що відбуваються під час волочіння зі зсувом. Така незвичайна поведінка матеріалу



а



б

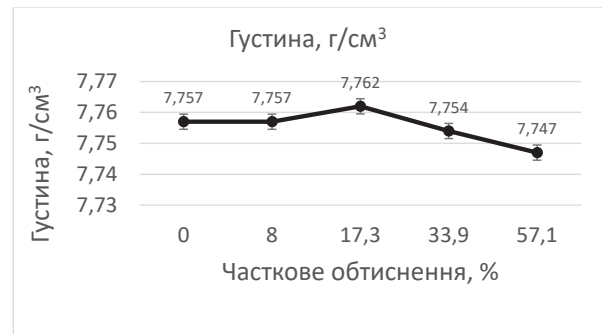


в

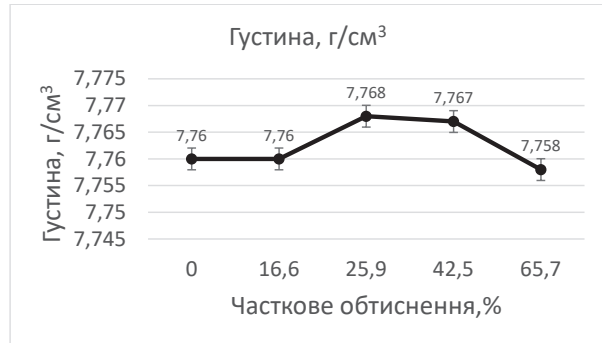
Рис. 3. Діаграма зміни межі міцності дроту за різних ступенів обтискання звичайною волокою після волоки зі зсувом та подальшого волочіння звичайною волокою:
а – 8% обтискання волокою зі зсувом;
б – 16,6% обтискання волокою зі зсувом;
в – 23% обтискання волокою зі зсувом

може бути пов'язана з формуванням великої кількості пор. Одним із методів, який опосередковано може дозволити оцінити кількість пор, сформованих деформацією, є дослідження густини металу.

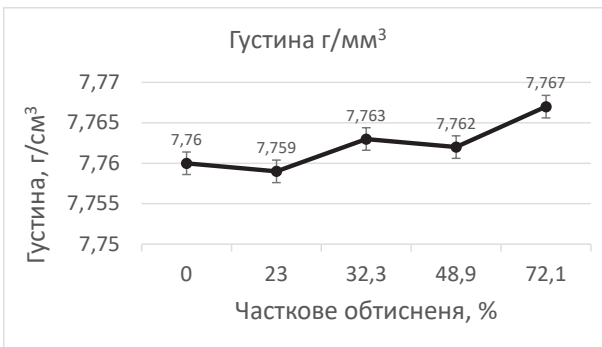
Дослідження з вимірювання густини показали, що за обтискання волокою зі зсувом (незалежно від ступеня деформації) густина в межах похибки не змінюється порівняно з вихідним зразком (рисунок 4). У разі подальшого обтискання круглою волокою густина збільшується порівняно зі щільністю дроту після волоки зі зсувом. Така поведінка може бути пояснена зміною



а



б



в

Рис. 4. Зміни густини за різних ступенів обтискання з використанням волок зі зсувом:
а – 8% обтискання волокою зі зсувом;
б – 16,6% обтискання волокою зі зсувом;
в – 23% обтискання волокою зі зсувом

течії металу в разі використання різних волок. Подальше збільшення обтиснень у разі використання круглих волок приводить до класичної картини зниження густини зі зростанням обтиснення. Виняток становить зміна поведінки густини після волоки зі зсувом з обтисканням 23%. Водночас зі збільшенням ступеня обтискання круглими волоками густина не падає, а має тенденцію до підвищення. Така незвичайна поведінка густини металу зі зростанням обтиснення може пояснюватися із припущення, що за великих ступенів деформації зміна зсувної волоки на круглу приводить до помітних змін напрямку течії

Часткове обтискання волокою зі зсувом 8%, загальне обтискання волочинням 57,1%

Часткове обтискання волокою зі зсувом 17%, загальне обтискання волочинням 65,7%

Часткове обтискання волокою зі зсувом 23%, загальне обтискання волочинням 72,1%



Рис. 5. Оптична мікроскопія дроту після обтискання зсувною волокою зі збільшенням ступеня деформації звичайним волочинням (подовжній перетин, центр, збільшення x 500)

металу та зменшення дефектів завдяки цьому ефекту (рисунок 5). На рисунку 5 гарно видно, що зерна міняють своє орієнтування щодо осі волочиння залежно від ступеня деформації зі зсувом. Виявлене явище є додатковим сприятливим чинником підвищення технологічної пластичності в разі волочиння зі зсувом.

Виходячи з наведених даних щодо густини, властивостей міцності та відносного звуження, можна зробити висновок, що волока зі зсувом з обтисненням у 23% дає оптимальне поєднання технологічних властивостей.

Висновки

1. Зі збільшенням ступеня обтиснення волокою зі зсувом приріст міцності знижується, а відносне звуження збільшується, що може пояснюватися зміною напрямку течії металу під час переходу від круглої волоки до волоки зі зсувом.

2. Оптимальним значенням ступеня обтиснення в разі волочиння за зсувом є 23%. Такий ступінь обтиснення дає мінімальний приріст міцності, що є одним з основних чинників збільшення технічної волочимості. Волочиння через волоку зі зсувом з обтисненням у 23% дає можливість у разі подальшого волочиння круглими волоками підвищити пластичні характеристики та водночас збільшити густину дроту. Це дозволило проволочити дріт до малих діаметрів без використання проміжного відпалу для пом'якшення структури.

3. Така нетрадиційна поведінка механічних характеристик і щільності свідчить про успадкування структури, сформованої зсувною волокою, явище може бути використане в удосконаленні технології волочиння зі зсувом для збільшення пластичності дроту у подальшому волочинні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. The effects of deformation and microstructure inhomogeneities in the Accumulative Angular Drawing (AAD) / K. Muszka et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2013. V. 574. P. 68–74.
2. Хоменко О.В. Інтенсивна пластична деформація: методи та математичні моделі формування наноматеріалів. *Журнал фізичних досліджень*. 2020. Т. 24. № 2. 2001. 20 с.
3. Комбінована пластична деформація зі зсувом для отримання великих заготовок / Л.І. Алієва та ін. *Обробка матеріалів тиском* : збірник наукових праць. Краматорськ : ДДМА, 2013. № 3 (36). С. 3–9.
4. Kapoor R. Severe Plastic Deformation of Materials. *Materials Under Extreme Conditions. Recent Trends and Future Prospects*. 2017. P. 717–754.
5. The effect of microstructure and texture evolution on mechanical properties of low-carbon steel processed by the continuous hybrid process / K.H. Sun et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2013. V. 579. P. 118–125.
6. The effect of the multi-pass non-circular drawing sequence on mechanical properties and microstructure evolution of low-carbon steel / W.L. Jung et al. *Materials & Design*. 2014. V. 55. P. 898–904.
7. Ресурс пластичності металів при холодному об'ємному формозмінненні / В.А. Огородніков та ін. Вінниця : ВНТУ, 2016. 176 с.
8. Моделювання процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання деталей з фланцем / Л.І. Алієва та ін. *Обробка матеріалів тиском* : збірник наукових праць. Краматорськ, 2019. № 1. С. 23–34.
9. Патент 133940 Україна, МПК В21J 5/00, В21K 21/00. Спосіб інтенсивного пластичного деформування, заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія / Л.І. Алієва та ін. № 11779 ; заяв. 29.11.2018 ; опубл. 25.04.2019. Бюл. № 8. 6 с.

10. Крутиння циліндричних заготовок ізотропно-зміцнюючихся матеріалів / В.А. Огородніков та ін. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. Серія «Технічні науки». 2012. Вип. 10 (2). С. 18–22.
11. Алієва Л.І. Удосконалення процесів комбінованого видавлювання : монографія. Краматорськ : ООО «Тираж – 51», 2018. 352 с.
12. Ресурс пластичності у процесах комбінованого видавлювання / Л.І. Алієва та ін. *Обробка матеріалів тиском* : збірник наукових праць. Краматорськ : ДГМА, 2013. № 1 (34). С. 11–17.
13. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module / N. Hrudkina et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. V. 3. № 1 (105). P. 17–22.
14. Continuous Severe Plastic Deformation of Low-Carbon Steel: Physical-Mechanical Properties and Multi-Scale Structure Analysis / A. Zavdoveev et al. *Steel research international*. 2021. V. 92. I. 3. 2000482.

REFERENCES:

1. Muszka, K., Madej, L., Majta, J. (2013). The effects of deformation and microstructure inhomogeneities in the Accumulative Angular Drawing (AAD). *Materials Science and Engineering: A*. V. 574. Pp. 68–74.
2. Khomenko, O.V. (2020). Intensyvna plastychna deformatsiia: metody ta matematychni modeli formuvannia nanomaterialiv [Intense plastic deformation: methods and mathematical models of nanomaterial formation]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen*. 2001. T. 24. № 2. 20 s. [in Ukrainian].
3. Alyeva, L.Y., Zhabankov, Ya.H., Markova, M.A., Tahan, L.V. (2013). Kombynovana plastychna deformatsiia iz zsvom otrymannya velykykh zagotovok [Combined plastic deformation with shear for obtaining large workpieces]. *Obrobka metaliv tyskom*: zb. nauk. pr. Kramatorsk: DDMA. № 3 (36). S. 3–9 [in Ukrainian].
4. Kapoor, R. (2017). Severe Plastic Deformation of Materials. *Materials Under Extreme Conditions. Recent Trends and Future Prospects*. Pp. 717–754.
5. Sun, K.H., Hyun, M.B., Heon, S., Yong-Taek, I., Chul, M.B. (2013). The effect of microstructure and texture evolution on mechanical properties of low-carbon steel processed by the continuous hybrid process. *Materials Science and Engineering: A*. V. 579. Pp. 118–125.
6. Jung, W.L., Hyun, M.B., Sun, K.H., Heon, S., Chul, M., Yong-Taek, I. (2014). The effect of the multi-pass non-circular drawing sequence on mechanical properties and microstructure evolution of low-carbon steel. *Materials & Design*. V. 55. Pp. 898–904.
7. Ohorodnykov, V.A., Derevenko, Y.A., Alyeva, L.Y. (2016). Resurs plastychnosti metaliv pry kholodnomu obiemnomu formozminenni [Resource of plasticity of metals during cold three-dimensional deformation]. *Vynnytysa: VNTU*. 176 s. [in Ukrainian].
8. Aliieva, L.I., Aliiev, I.S., Hrudkina, N.S., Malii, Kh.V. (2019). Modeliuvannia protsesu kombinovanoho radialno-zvortnoho vydavliuvannia detalei z flants'em [Modeling of the process of combined radial-reverse extrusion of parts with a flange]. *Obrobka metaliv tyskom*: zb. nauk. pr. Kramatorsk: DDMA. № 1. S. 23–34 [in Ukrainian].
9. Aliieva, L.I., Aliiev, I. S., Malii, Kh.V., Kordenko, M.Yu. (2019). *Patent 133940 Ukraina*, MPK B21J 5/00, B21K 21/00. Sposib intensyvnoho plastychnoho deformuvannia / Zaiavnyk ta patentovlasnyk Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia. № u 2018 11779; zaiavl. 29.11.2018; opubl. 25.04.2019 [Patent 133940 Ukraine, IPC B21J 5/00, B21K 21/00. Method of intensive plastic deformation/applicant and patent holder Donbas State Machine-Building Academy. № u 2018 11779; statement 29.11.2018; published 25.04.2019]. *Biul.* № 8. 6 s. [in Ukrainian].
10. Ohorodnykov, V.A., Derevenko, Y.A., Ulanovskyi, V.M. (2012). Krutinnya tsylyndrychnykh zahotovok yzotropno – zmychnuyuchyhsya materyaliv [Rotation of cylindrical blanks of isotropically hardening materials]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*. Seriia “Tekhnichni nauky”. Vyp. 10 (2). S. 18–22 [in Ukrainian].
11. Alyeva, L.Y. (2018). Udoskonalennya protsesiv kombinovanoho vydavlyvannya: monohrafiya [Improvement of combined extrusion processes: monograph]. *Kramatorsk: ООО “Тираж – 51”. 352 s. [in Ukrainian].*
12. Alyeva, L.Y., Derevenko, Y.A., Syvak, R.Y. (2013). Resurs plastychnosti v protsesakh kombinovanoho vydavlyvannya [Plasticity resource in combined extrusion processes]. *Obrobka metaliv tyskom*: zb. nauk. pr. Kramatorsk: DDMA. № 1 (34). S. 11–17 [in Ukrainian].
13. Hrudkina, N., Aliieva, L., Markov, O., Kartamyshev, D., Shevtsov, S., Kuznetsov, M. (2020). Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. V. 3. № 1 (105). Pp. 17–22.
14. Zavdoveev, A., Baudin, T., Pashinska, E., Kim, H., Brisset, F., Heaton, M., Poznyakov, V., Rogante, M., Tkachenko, V., Klochkov, I., Skoryk, M. (2021). Continuous Severe Plastic Deformation of Low-Carbon Steel: Physical-Mechanical Properties and Multi-Scale Structure Analysis. *Steel research international*. V. 92. I. 3. 2000482.