

ПАШИНСЬКА ОЛЕНА

Університет «Метінвест Політехніка», Інститут електрозварювання ім. О.Є. Патона НАНУ

<https://orcid.org/0000-0001-7102-1544>e-mail: [elena.pashinska@gmail.com](mailto:elena.pashinska@gmail.com)

ЗАВДОВЕЕВ АНАТОЛІЙ

Інститут електрозварювання ім. О.Є. Патона НАНУ

<https://orcid.org/0000-0003-2811-0765>e-mail: [avzavdoveev@gmail.com](mailto:avzavdoveev@gmail.com)

КРАЛЮК МАРИНА

Одеський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України, м. Одеса

<https://orcid.org/0000-0002-0693-9508>e-mail: [m-kraluk@ukr.net](mailto:m-kraluk@ukr.net)

## РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ КОМБІНОВАНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ МАЛОВУГЛЕЦЕВОГО ДРОТУ, ЩО ҐРУНТУЄТЬСЯ НА ПРОКАТЦІ ІЗ ЗСУВОМ, ПОЄДНАНІЙ ІЗ ВОЛОЧІННЯМ

*Розглянуто структуру та властивості маловуглецевого дроту 08Г2С після проведення двох типів прокатки: гарячої прокатки зі зсувом (ПС) та стандартної гарячої прокатки (СТ), що застосовується для масового виробництва катанки на ВАТ "Міттал Стіл Кривий Ріг". Після різних видів прокатки проведено холодне волочіння (В) за однаковими режимами. Отримано зразки двох типів: ПС+В та СТ+В. Було досліджено фізико-механічні властивості матеріалів; встановлювали закономірності формування мікроструктури та тонкої структури. У роботі доказано, що є різниця між механізмами структуроутворення при СТ і ПС. Показано спадковий вплив тонкої структури сталі після гарячої прокатки на холодне волочіння. При СТ+В спостерігається подрібнення зерен зі зростанням ступеня деформації. Після ПС+В немає поетапного подрібнення зерен із зростанням ступеня деформації. При ПС+В реалізується чергування фрагментації та низькотемпературної механоіндукованої рекристалізації. У статті показано, що за умови використання технології прокатки зі зсувом, за рахунок реалізації цього сценарію трансформації структури, можна отримати катанку з підвищеними властивостями без додаткових відпалів.*

*Ключові слова: структура, властивості, механізми, гаряча прокатка, зсувна прокатка, волочіння.*

PASHYNSKA OLENA

"Metinvest Polytechnic" University, Institute of Electric Welding named O.E. Paton of NASU

ZAVDOVEEV ANATOLIY

Institute of Electric Welding named O.E. Paton of NASU

KRALYUK MARYNA

Odesa Research Institute of Forensic Science of the Ministry of Justice of Ukraine, Odesa

## RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY OF COMBINED DEFORMATION OF LOW-CARBON WIRE BASED ON SHEAR ROLLING COMBINED WITH DRAWING

*The structure and properties of low-carbon wire 08G2S after two types of rolling are considered: hot shear rolling (RS) and standard hot rolling (ST), used for mass production of wire rod at ArcelorMittal Kryvyi Rih PJSC. After different types of rolling, cold drawing (D) was carried out using the same conditions. Samples of two types were obtained: RS+D and ST+D. The physical and mechanical properties of materials were studied; established patterns of microstructure and fine structure formation. The work proved that there is a difference between the mechanisms of structure formation in RS and ST. The hereditary influence of the fine structure of steel after hot rolling on cold drawing processes is shown. With ST+D, grain refinement is observed with increasing degree of deformation. After RS+D there is no gradual refinement of grains with increasing degree of deformation. With RS+D, an alternation of fragmentation and low-temperature mechanically induced recrystallization occurs. The article shows that, provided that shear rolling technology is used, through the implementation of this structure transformation scenario, it is possible to obtain wire rod with improved properties without additional annealing.*

*Keywords: structure, properties, mechanisms, hot rolling, shear rolling, drawing.*

### Постановка проблеми

Наукові центри в США, Німеччині, Україні посідають провідні позиції у світі з розроблення та досліджень структурної модифікації перспективних, функціональних і конструкційних матеріалів. У тому числі приділяється значна увага проблемі отримання матеріалів зі зміненим співвідношенням міцність - пластичність за допомогою методів інтенсивної пластичної деформації зі зсувом (ППД) з метою підвищення їхніх фізичних і механічних властивостей. У роботі [1] наведено дані про сучасні напрямки досліджень в галузі управління мікро- і наноструктурами з використанням ППД. Такі процеси привертають все більше уваги, як потужний інструмент управління макро- і наноструктурами. ППД процеси забезпечують покращені механічні та функціональні властивості широкого спектру матеріалів, включаючи метали та сплави, інтерметаліди, кераміку, оксиди, напівпровідники та полімери. Продовжується дослідницька діяльність з контролю мікро- і наноструктур з використанням ППД процесів для досягнення поліпшених структурних і функціональних властивостей. Ці заходи з'являються приблизно в 1000 публікаціях за рік у відомих журналах. Нові тенденції в області ППД часто обговорювалися світовими лідерами в області матеріалознавства та інженерії поверхонь. Совершенствование методів ППД для безперервної або

крупномасштабної обробки, контроль фазового перетворення, синтез нових матеріалів при інтенсивному деформуванні, застосування до неметалевих матеріалів, таких як полімери та оксиди, а також досягнення поліпшених структурних і функціональних властивостей є самими останніми тенденціями, в той час як вклад теоретичних досліджень також росте. Однак у публікації відмічаються певні проблеми при адаптуванні методів ПД до крупнотонажних схем обробки, щоб можна було отримати велику кількість матеріалів з покращеними властивостями. Така задача особливо актуальна для промислових металів і сплавів.

#### Аналіз останніх джерел

В роботі [2] процеси ПД визначаються як ефективні процеси формування металу тиском, у яких дуже велика пластична деформація накладається на об'ємний процес, щоб отримати наддрібнозернистий метал. Метою процесів ПД для створення наддрібнозернистого металу є виробництво легких деталей із використанням високоміцного металу для безпеки та надійності деталей. У цієї роботи на прикладі процесів рівноканального кутового пресування, накопичувального роликового з'єднання, кручення під високим тиском та інших показана зміна властивостей металів, оброблених процесами ПД. Нарешті, обговорюється застосування ультрадрібнозернистих металів методами ПД. Крім того, також розглянуто комбіновані процеси, розроблені нещодавно. Автори роблять висновок, що такі процеси верогіднее всього будуть реалізовані у промисловості.

У роботі [3] приведено дані, що деформація зсуву є одним із ефективних способів інженерії меж зерен. Особливістю ПД технології є зменшення структурної анізотропії. Цей ефект пов'язаний із застосуванням деформуючої оснастки із зсувом, який змушує потік металу змінювати свій напрямок. ПД технологія призводить до значного збільшення частки дрібних зерен (розміром менше 3 мкм) і зменшення частки великих зерен. У цьому випадку реєструється велика кількість дрібних зерен з кутовими межами. Утворення такого роду зерен пояснюється реалізацією конкуруючих процесів дроблення зерен і безперервної динамічної рекристалізації. Результатом протікання цих процесів є зміна типу меж зерен з гладких на зубчасті та утворення незамкнених висококутових меж зерен. Крім того, показано, що певна частина дрібних зерен забезпечує зернограничне ковзання. Порівняльний аналіз випробувань на твердість продемонстрував зростання твердості з накопиченням деформації, але після класичного витягування твердість зростає лінійно, а після експериментального ступінчато. У роботі зроблено висновок о необхідності вивчення саме механізмів тонкої структури металів та сплавів після ПД. В роботі [4] розглянуто сплав для накопичення водню на основі Ті. Він є одним із найпоширеніших матеріалів для зберігання водню через його високу здатність поглинати водень та низьку температуру дегідратування. У статті представлено вплив кількох різних методів підготовки сплаву Ті на продуктивність зберігання водню, включаючи нові методи пластичної деформації рівноканальне кутове пресування і кручення під високим тиском. Було виявлено, що незначне введення дефектів решітки, включаючи дислокації, межі зерен, межі субзерен і тріщини внаслідок ПД, було корисним для покращення кінетичної характеристики гідратування/дегідратування. Однак неоднорідний склад і залишкова напруга сплаву після ПД не сприяє покращенню здатності до зберігання водню. Зроблено висновок, що у майбутньому можна було б очікувати, що нові методи та технології в поєднанні з допантом і модифікацією будуть застосовані до сплавів для зберігання водню на основі Ті, щоб зробити прорив у практичному застосуванні. В статі [5] показано, що обробка методом рівноканального кутового пресування впливає на морфологію g-виділень у сплаві Al-Zn-Mg-Cu (Al-7136). Просвічуюча електронна мікроскопія показала, що ЕСАР змінює орієнтацію преципітатів, і це впливає на атомну конфігурацію та міжфазну енергію на межах розділу  $\eta/\alpha$ -Al. Отже,  $\eta$ -преципітати приймають ізотропний режим росту та еволюціонують у рівновісні частинки. Аналіз тривимірного атомного зонду демонструє, що великі  $\eta$ -преципітати, утворені під час різної кількості проходів ЕСАР, мають подібний склад. Злиття менших преципітатів, а не фрагментація більших преципітатів, домінує в еволюції преципітатів. У роботі зроблено висновок, що ПД деформація суттєво впливає на перерозподіл легуючих елементів у сплаві і це може бути окремим напрямком керування функціональними властивостями матеріалів.

Таким чином, огляд наукової літератури за останні двадцять років [1-8, 12-13] дає змогу сказати, що у ній широко обговорюються спеціальні методи інтенсивної пластичної деформації зі зсувом, які дають змогу підвищити властивості матеріалів. Одним із актуальних напрямків є напрямок застосування методів ПД к металам та сплавам, котрі широко використовуються у промисловості. З однієї сторони, дослідження проводяться з метою підвищення міцнісних характеристик. А з другого боку, такі матеріали мають бути не крихкими, а зберігати технологічну пластичність. Особливо привабливо ця ідея виглядає, якщо можна отримати міцний матеріал з достатньою технологічною пластичністю без проведення додаткового відпалу. Особливо це актуально для метизних заводів з великотонажним виробництвом в умовах економії енергоресурсів. Наприклад, для метизних заводів, що виготовляють дріт, важливим є однорідність фізико-механічних властивостей і структури закупленої катанки для того, щоб знизити обривність дроту і, як наслідок, знизити витрати на переробку. Заводи з переробки катанки в дріт зазвичай контролюють хімічний склад і фізико-механічні властивості катанки. Якщо ж цих заходів недостатньо, то зазвичай підвищують пластичні характеристики дроту за рахунок проміжного пом'якшувального відпалу. Однак це призводить до зростання вартості переробки катанки в дріт, ускладнює процес виробництва і подовжує виробничий процес.

Тому дуже актуальним є питання підвищення пластичності без відпау за рахунок використання нових методів інтенсивної пластичної деформації зі зсувом.

При таких схемах формується особлива структура, що призводить до росту міцнісних властивостей при достатніх рівнях характеристик пластичності. Відбувається це завдяки формуванню особливої тонкої структури, у якій процеси структуроутворення йдуть за іншим сценарієм, якщо порівнювати процеси класичної прокатки та прокатки зі зсувом [6]. Однак досі не зрозуміло, як проявлять себе особливості структури, сформованої при таких деформаціях, під час подальших термічних і деформаційних впливів. У даній роботі розглянуто схему прокатки зі зсувом, яка на сьогодні є одним із прикладів доведення технологій інтенсивної пластичної деформації до промислового впровадження.

**Метою цієї роботи** було уточнити механізми структуроутворення в катанці під час прокатки зі зсувом, щоб можна було використати їх у подальшому виробничому процесі виробництва дроту для поліпшення його якості.

#### Виклад основного матеріалу

Прокатку і волочіння сталі 08Г2С (С-0,08%, Мп-1,87%, Si-0,82%, S-0,020%, Р-0,022%, Cr-0,02%, Ni-0,02%, Cu-0,02%, N<sub>2</sub>-0,007%) проводили в умовах ВАТ "Міттал стіл Кривий Ріг" по технології комбінату, яка передбачає: 1 - нагрів заготовки до температури 1200-1250<sup>0</sup>С, 2 - здійснювання прокатки за стандартною технологією (СТ), 3 - виконання холодного волочіння (В). По такій же схемі проводили прокатку зі зсувом по експериментальній технології (ПС). За допомогою ПС отримали катанку, яку потім так же само переробляли на дріт різних діаметрів. Під час виготовлення катанки за ПС-технологією кількість проходів і умови охолодження збігалися з аналогічними параметрами СТ-технології. Отриману катанку в обох випадках змотували в бунти. Слід зазначити, що ПС-технологія характеризується значними разовими обтисканнями, особливістю якої є створення значних зсувних деформацій у процесі формозміни в калібрах [7].

Потім катанка, виготовлена за технологією СТ, була перероблена в дріт методом холодного волочіння до дроту  $\varnothing 2,3$  мм. При досягненні дротом  $\varnothing 3,4$  мм стало неможливим провести подальше волочіння через втрату пластичності і, як наслідок, подальших численних поривів. Тому дріт,  $\varnothing 3,4$  мм для відновлення пластичності піддали проміжному пом'якшувальному відпау в трубчастій печі за температури 600<sup>0</sup>С з охолодженням на повітрі. Катанка, виготовлена за технологією ПС, перероблена в дріт методом холодного волочіння до  $\varnothing 1,96$  мм без проміжного відпау. Відбір зразків для досліджень проводили з середини бунтів для обох технологій.

Для оцінки дефектності структури металу визначали щільність зразків методом гідростатичного зважування за методикою, описаною в [6]. Отриману катанку випробували на розтягнення для визначення характеристик пластичності та міцності. Для цього від середини кожного бунта відбирали по три зразки довжиною 350 мм. Провідність зразків дроту вимірювали за стандартною чотирьохзондовою методикою. Контролювали поперечний і поздовжній переріз дроту кожного діаметра. Травлення шліфів здійснювали 4-х % спиртовим розчином HNO<sub>3</sub> та 3-х % спиртовим розчином пікринової кислоти для виявлення чіткої картини кордонів зерен по методикі описаній в [8]. Структурні дослідження проводили за допомогою металографічного мікроскопа Axiovert 40MAT. Крім того, для аналізу структурних змін застосовувався електронний скануючий мікроскоп СЕМ (Jeol JSM-6490LV). Аналіз за величиною зерен, за розорієнтуванням, за питомою часткою рекристалізованих зерен (з кількісною оцінкою), та кількісний аналіз структури виконували з використанням методу дифракції зворотнорозсіяних електронів (ДОЕ/EBSD, Nordlys S, HKL Channel 5) за методикою [8].

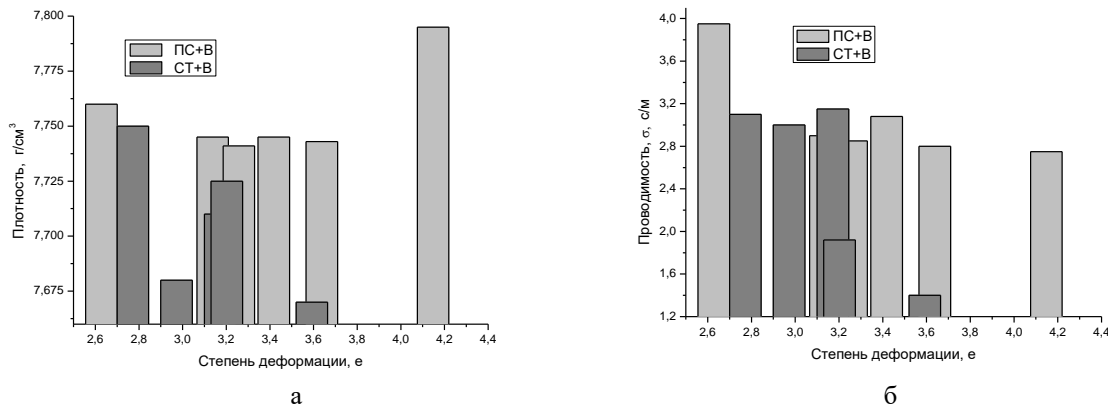
Як гаряча, і холодна пластична деформація призводить до збільшення кількості структурних дефектів. Їх скупчення може спричинити руйнування металу. Порівняємо фізичні характеристики металу, отриманого за експериментальною та традиційною технологією. Прокатка зі зсувом істотно впливає такі фізичні властивості, як щільність і провідність. На заключному етапі прокатки метал, оброблений технологією ПС, має щільність матеріалу на 0,64% більшу, ніж при СТ (Рис.1а). При цьому питомий електроопір на 5% менше (Рис.1б). Даний факт свідчить про менш інтенсивне накопичення дефектів та мікронесушностей при обробці ПС-технологією. За даними [9], відносна зміна щільності на 0.5% обумовлюється накопиченням мікронесушностей таких, як мікропори та мікротріщини. Автори відмічають, що зміна густини дислокацій призводить до набагато меншої зміни щільності. Таким чином, зміна щільності на 0,64%, яку ми спостерігали можна віднести за рахунок зміни кількості мікропор та мікротріщин. Це саме стосується також і зміни провідності на 5%.

Аналіз зміни щільності металу також дозволяє опосередковано оцінити дефектність його структури. Результати дослідження зміни густини дроту з різним ступенем деформації представлені на рис. 1. Видно, що значення вихідні значення щільності катанки, отриманої СТ-технологією, становить 7,75 г/см<sup>3</sup>, для прокатки зі зсувом густина знаходиться приблизно на такому ж рівні і становить 7,74 - 7,75 г/см<sup>3</sup>.

Волочіння катанки, приготовленої за СТ-технологією, у середньому призводить до зменшення щільності матеріалу з 7,75 до 7,674 г/см<sup>3</sup>. На етапі волочіння з  $\varnothing 3,5$  до  $\varnothing 3,4$  ( $\epsilon=3,1$  та  $\epsilon=3,13$  відповідно) відбувається помітне збільшення щільності внаслідок проведення проміжного відпау. При дослідженні дроту, отриманого з катанки, виготовленої за ПС-технології, спостерігається інший характер зміни щільності (рис. 1 а).

Щільність дроту після ПС до  $\phi 3,0$  мм,  $\epsilon=3,8$  практично не змінюється, але при досягненні  $\phi 1,96$  мм,  $\epsilon=4,22$  вона зростає до  $7,8 \text{ г/см}^3$ . Причиною такого підвищення густини може бути розвиток активного масопереносу в ході релаксаційного процесу в процесі волочіння. Подібне явище може призводити до зменшення кількості дефектів та/або лікування мікропор.

На рис. 1б наведені дані щодо провідності дроту в залежності від ступеня деформації волочінням. Добре видно, що загалом при волочінні дроту, отриманого по СТ-технології спостерігається падіння провідності зі зростанням ступеня деформації. Невелике підвищення провідності спостерігається лише після відпалу при  $\epsilon=3,13$ . Така зміна провідності є типовою, і зазвичай пов'язується зі зростанням кількості дефектів у процесі холодної деформації [10].



**Рис.1. Залежність зміни щільності (а) та провідності (б) від ступеня деформації зразків із сталі 08Г2С: темно-сірі стовпці – СТ+В, світло-сірі стовпці – ПС+В**

Зміни провідності у дроті після прокатки зі зсувом (ПС+В) має інший характер: на першому етапі волочіння ( $\epsilon=2,7\div 3,1$ ) провідність зменшується, а на другому етапі ( $\epsilon>3,1$ ), зі зростанням ступеня деформації, вона практично не змінюється, осцилюючи навколо середнього значення. Зміни на графіках зміни щільності та провідності показує, що вони синхронні. А саме, для СТ+В спостерігається поступове зниження щільності матеріалу та провідності зі зростанням ступеня деформації. Ці зміни є типовими, тоді як зміни щільності та провідності для ПС+В технології незвичайні. Ці дані свідчать про те, що кількість дефектів внутрішньої будови в дроті, виготовленого за технологією ПС+В, при зростанні ступеня деформації спочатку зростає, а потім зменшується.

Таким чином, за допомогою ПС+В при більшій мірі досягнутої інформації вдається отримати провідність у два рази більшу, ніж при СТ+В, незважаючи на те, що ступінь досягнутої деформації дроту співвідноситься як  $\epsilon=4,3$  і  $\epsilon=3,5$  відповідно. Такі значні зміни фізичного стану матеріалу мають пояснюватись змінами структурного стану. У наступному розділі статті розглянемо: які процеси можуть призводити до таких кардинальних змін?

У табл. 2 представлені результати механічних випробувань катанки та дроту. При волочінні катанки, отриманої обома технологіями, спостерігається зростання її міцності. Катанка, отримана за технологією ПС+В, має помітно більші значення межі міцності, ніж катанка, виготовлена за СТ+В-технології ( $\sigma=1300$  МПа і  $1060$  МПа відповідно). Це пов'язано з більшою загальною досягнутою деформацією при ПС+В. Слід також відзначити зменшення міцності дроту, отриманого за технологією СТ+В, на переході зі  $\epsilon=3,1$  до  $\epsilon=3,16$ . Це пояснюється проведенням проміжного відпалу, і крім зниження міцності призводить до зменшення значення провідності та щільності (рис. 1).

На останньому етапі деформування відмінності кількості перегинів (табл. 2) – для двох технологій незначні. Для дроту, отриманого за технологією СТ+В, досягнення ступеня деформації  $\epsilon=3,52$  призвело до зростання кількості разривів і процес волочіння довелося зупинити незважаючи на проміжний відпал. Однак, дріт після ПС-технології вдалося проволочити до значно більших сумарних ступенів деформацій без додаткового відпалу. Це свідчить про більшу технологічну пластичність дроту, отриманого за ПС+В-технології, т.к. ступінь деформації, досягнута за цією технологією, складала  $\epsilon=4,22$ . Збільшення під час волочіння щільності, числа перегинів, тимчасового опору розриву дроту, отриманого за ПС+В технології, не укладається в традиційну картину структуроутворення. Неодноразово показано, що збільшення ступеня деформації волочінням повинно призводити до зростання міцності та зниження пластичних характеристик [11].

Таблиця 2.

**Результати механічних випробувань**

Вид виробу	Степень деформації, $\epsilon$		Діаметр дроту, мм		$\sigma_b, \text{Н/мм}^2$		Кількість перегинів	
	ПС	СТ	ПС	СТ	ПС	СТ	ПС	СТ

катанка	2,7	2,7	9,15	6,0	600-620	525-540	7-8	6-7
дрот	3,21	2,9	5,45	5,25	800-830	760-780	6-7	5-6
дрот	3,33	3,1	4,81	3,50	870-890	1040-1060	7-8	4-5
дрот	3,49	3,13*	4,10	3,40*	990-1010	990-1020*	4-5	4-5*
дрот	3,71	3,52	3,00	2,30	1000-1020	1040-1060	3-5	4-5
дрот	4.22	проволо- чити не вдалося	1,96		1280-1310		3-5	

\*при переході на етапі  $\varnothing 3,5 \div \varnothing 3,4$  мм був виконан проміжний відпал

Можна висловити гіпотезу, що така принципова різниця в поведінці дроту при різних способах одержання полягає у можливості розвитку активних релаксаційних процесів внаслідок застосування ПС+В технології та особливості структури після деформації зі зсувом успадковуються при подальших обробках. Наблюдаємо, що у металі, обробленому за ПС+В технології, зміна щільності зі збільшенням ступеня деформації під час волочіння відбувається інакше, ніж у металі після традиційної обробки. Відомо, що при волоченні може відбуватися заліковування пір. Обговоримо механізми, за якими це могло б відбуватися.

По-перше, збільшення щільності під час волочіння могло б пояснюватися розвитком рекристалізації. Однак, в експерименті здійснювалося холодне волочіння. Зафіксовано, що нагрівання у волоках було не більше  $150^{\circ}\text{C}$ . Тому такий розігрів не може призводити до розвитку рекристалізації у звичайному розумінні, але процес може здійснюватися за механізмом бездифузійної механоіндукованої рекристалізації [12]. Цими авторами, які використовували моделювання методами молекулярної динаміки, показано, що при ПД може реалізуватися процес укрупнення зерен не за рахунок дифузійних процесів, а за рахунок текстурного злиття зерен, і такий процес може протікати при низьких температурах. Текстура співвісна орієнтація різних зерен призводить до умови, коли необхідність існування кордонів між однаково орієнтованими зернами відпадає, і вони зливаються в одне велике зерно. При цьому злиття може відбуватися як за рахунок кордонів, нормаль яких орієнтована співвісно розтягувальній силі, що призводить до подовження зерна, так і за рахунок кордонів, нормаль яких орієнтована перпендикулярно розтягує силі, що призводить до збільшення поперечного розміру зерна.

По-друге, те, що спостерігається одночасно підвищення тимчасового опору розриву, мікротвердості, щільності та провідності може свідчити про зменшення кількості мікропор. Волочіння може сприяти розвитку повернення та стоку вакансійних утворень. Точніше встановлення релаксаційного механізму, що призводить до зміни властивостей, що обговорюється, можливе при вивченні мікроструктури дроту і його тонкої структури, що і буде зроблено нижче.

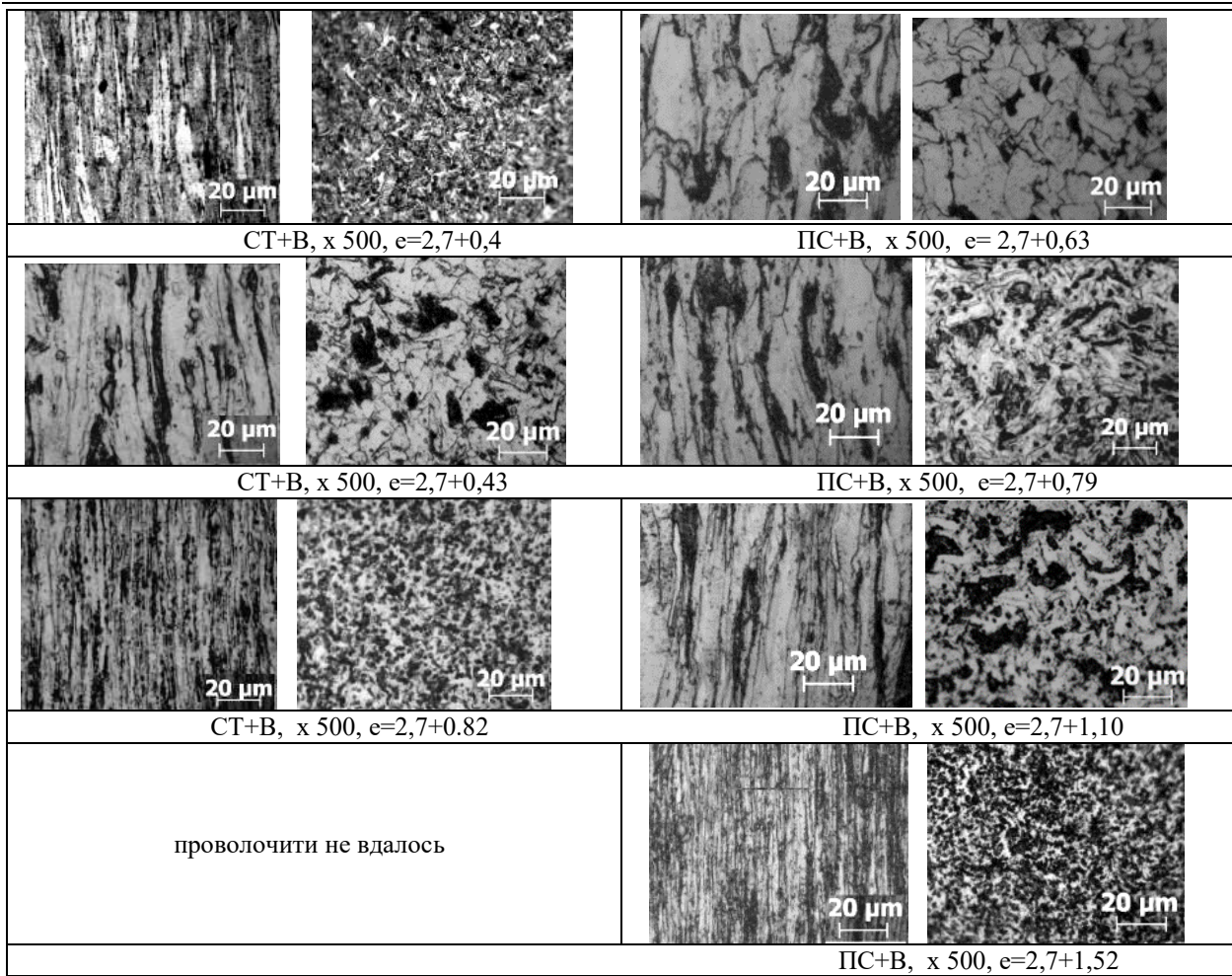
Дослідження вихідної мікроструктури катанки зі сталі 08Г2С показали, що структура являє собою однорідну ферито-перлітну суміш (табл. 2). Мікроструктура катанки  $\varnothing 6$  мм, отриманої за СТ-технологією, у поперечному напрямку являє собою рівноосні зерна фериту та перліту, середній розмір зерна 10 мкм. У поздовжньому напрямку спостерігається витягнутість зерен перліту, середній розмір зерна 14,8 мкм (рис. 2). З рис. 2 видно, що з збільшенням ступеня деформації для СТ+В зменшується середній розмір зерен у поперечному перерізі і збільшується розмір зерна в поздовжньому перерізі, тобто у напрямку осі деформації. Спостерігається деяке збільшення  $d_{\text{прод}}$  на передостанньому етапі деформації ( $\epsilon=0.40$  відповідно), що пов'язано з відпалом, виконаним на цій стадії волочіння. Отримані значення корелюють зі значеннями щільності та мікротвердості для партії СТ (рис.1).

Таблиця 2

**Мікроструктура дроту із сталі 08Г2С, виготовленої за СТ+В та ПС+В технологіям:**

СТ та СТ+В		ПС та ПС+В	
Поздовжній переріз/Поперечний переріз		Поздовжній переріз/Поперечний переріз	
СТ, x1000, $\epsilon=2,7$		ПС, x1000, $\epsilon=2,7$	
СТ+В, x 500, $\epsilon=2,7+0,2$		ПС+В, x 500, $\epsilon=2,7+0,51$	





Мікроструктура після СТ+В загалом має типовий вид анізотропної структури, характерної матеріалу після холодного волочіння (табл. 2). Із табл. 2 видно, що після ПС структура однорідна. Мікроструктура катанки, отриманої за ПС-технологією, у поперечному напрямку являє собою рівноосні зерна фериту та перліту. Розміри зерен вздовж і впоперек напрямку прокатки мало відрізняються рис. 2 (7,5 мкм). Для ПС катанки спостерігається відсутність різнозернистості, на відміну від СТ катанки. Інакше кажучи, структура металу після ПС характеризується однорідністю, рівновісністю та ізотропністю структури в поперечному і поздовжньому перерізах. Мікроструктура катанки після СТ дисперсніша в порівнянні з катанкою після СТ. При цьому зерна в значній мірі рекристалізовані. Дані за середніми розмірами зерен катанки та дроту після ПС+В показують ту ж тенденцію витягування зерен у напрямку волочіння та зменшення їх поперечного розміру, що і дріт після СТ+В. Однак на першому ж етапі волочіння (з  $\epsilon=2,7$  до  $3,49$ ) у ПС спостерігається деяке зростання  $d_{\text{попер}}$ , що з урахуванням зниження мікротвердості та підвищення щільності, може бути пов'язане розвитком якогось релаксаційного процесу. При подальшому волоченні дроту починаючи з  $\epsilon=3,49$  в поперечному напрямку зерна втрачають рівновісність, набуваючи вихрової форми (табл. 2 б,в). З підвищенням ступеня деформації дроту цей ефект стає більш вираженим. У поздовжньому напрямі зі збільшенням ступеня деформації відбувається формування типової для волочіння волоконної структури, а волокна мають складну форму.

По рис. 2 видно, що по мере збільшення ступеня деформації для СТ+В технології зменшується середній розмір зерен в поперечному сеченні, і збільшується розмір зерна в продольному сеченні, т.е. в напрямленні осі деформації. Наблюдается увеличение  $d_{\text{прод}}$  на этапе деформации от  $\phi$  3,5 до  $\phi$  3,4 мм ( $\epsilon=3,5$  и  $\epsilon=3,56$  соответственно), что связано с отжигом, выполненным на этой стадии волочения.

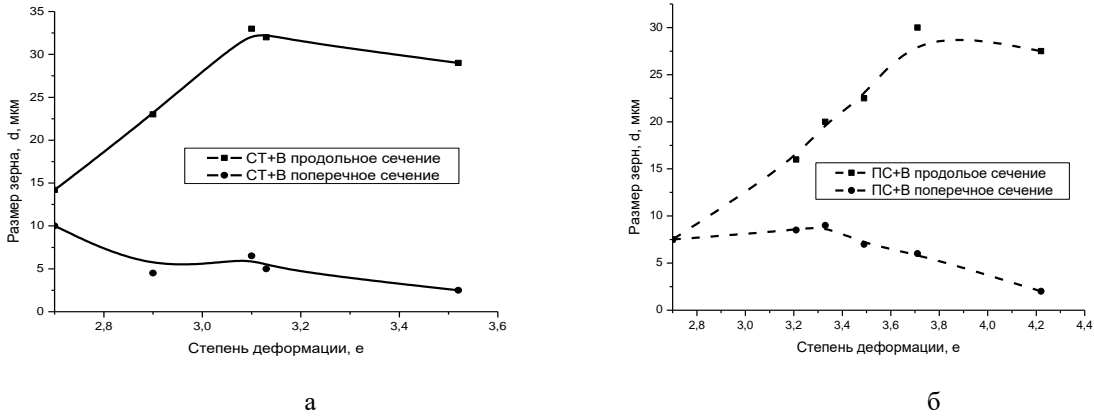


Рис. 2. Зависимость размеров зерен феррита стали 08Г2С от степени деформации после СТ+В (а) и ПС+В (б)

Після обробки за режимом ПС+В у поздовжньому перерізі спостерігається поступове збільшення розміру зерна зі зростанням ступеня деформації. У поперечному перерізі зерна зменшуються у розмірах приблизно 3,5 раз, на відміну СТ+В, де спостерігається зменшення розміру зерна приблизно у 10 раз. Таким чином виходить, що незважаючи на велику досягнуту деформацію значення середнього розміру зерен для технології ПС+В і в поперечному і поздовжньому перерізі більше, ніж при СТ+В. Це може говорити або про зміну розташування зерен щодо осі деформації при волоченні, або збільшення розміру зерен через релаксаційних процесів типу бездифузійної механоіндукованої рекристалізації. Подальше уточнення механізму можливе у разі аналізу карток рекристалізації, отриманих при аналізі мікроструктури із застосуванням растрового електронного мікроскопа.

Мікроструктури дроту, отримані із застосуванням растрового електронний мікроскопа з використанням EBSD – аналіза наведені на рис. 3. Після СТ структура характеризується різнозернистістю, що підтверджує дані мікроскопії рис. 3а (1). Причому зерна мають як різні розміри, так й різну форму. Крім того, існує певна кількість зерен зі сформованою субструктурою. Ці малокутові межі промальовані сірим кольором рис. 3а (2). Видно, що після ПС структура однорідніша, зерна практично рівноосні рис. 3б (1). У такій структурі сформовані переважно висококутові кордони (на рис. 3б (2) вони позначені чорними лініями). У середині зерна субструктури немає. За даними карт Шміда, можна судити про однорідність розподілу деформації в металі, оскільки вони показують, у якому зерні почнеться раніше деформація при одноосному навантаженні. Там, де колір зерна світло-зелений - деформація почнеться раніше і лише потім вона розпочнеться в інших зернах, пофарбованих темнішим. По рис. 3 (порівняти а (2) і б (2)) добре видно, що у разі ПС деформація розподілена більш однорідно.

Розглянемо карти рекристалізації рис. 3 (3). Для визначення типу зерен використовувався критерій Хамфрі. Відповідно до такого підходу рекристалізовані зерна не повинні мати субструктуру, вони повинні бути оточені великокутовими кордонами і розмір зерен повинен бути меншим за 4 мкм. Виходячи з цього критерію були отримані карти рекристалізації за якими видно, що після прокатки зі зсувом вдається отримати велику кількість рекристалізованих зерен, натомість при СТ – технології сформована велика кількість полігонізованих.

Вид исследованной микроструктуры в образцах разных технологий деформации					
1	2	3	1	2	3
а (технология СТ)			б (технология ПС)		
в (технология СТ+В)			г (технология ПС+В)		
1	2	3	1	2	3

Рис. 3. Мікроструктура катанки: СТ - (а), ПС - (б) та дроту СТ+В - (в)  $e=3,52$  та ПС+В - (г)  $e=4,22$ . 1-карти орієнтувань; 2-карти фактора Шміда: світло-сірі межі – малокутові, чорні межі – великокутові; 3 - карти рекристалізації: сині зерна – рекристалізовані, жовті зерна – полігонізовані, червоні зерн - деформовані). Масштаб – 20 мкм. Поперечний переріз

Цікаво, що у зразках ПС це не призводить до втрати властивостей міцності (див. табл. №1), а навпаки: отримана після ПС катанка демонструє вищі значення межі міцності. Найімовірніше це пов'язано з формуванням при ПС дрібнішого зерна проти СТ технології та особливими властивостями сформованих границь зерен. Суттєві відмінності у поведінці зеренної структури спостерігаються також за подальшого волочіння отриманої катанки.

При волоченні дроту отриманої СТ+В технологією відбувається традиційне зменшення поперечного розміру зерен зі зростанням ступеня деформації, структура стає одноріднішою і рівнооснішою. У великих зернах спостерігається субструктура (рис. 3а (2)). Карти рекристалізації дроту (рис. 3а (3)) показують, що структура складається з дрібних зерен трьох типів: рекристалізованих зерен фериту, зерен із субструктурою, структурованою в малокутові межі та/або фрагменти малокутових кордонів, та деформованих зерен. Рекристалізовані зерна та зерна з субструктурою мають приблизно однакові розміри. На відміну від них деформовані зерна мають розмір у 5-8 разів більший, і містять у собі хаотично розташовану субструктуру, яка ще не оформилася у стінки чи комірки.

Волочений метал після прокатки зі зсувом демонструє зовсім інший сценарій трансформації структури зі зростанням ступеня деформації волоченням. Наприклад, кількість рекристалізованих зерен у катанці після ПС істотно більша, ніж у випадку СТ, де в основному сформовані зерна з субструктурою. Проте після волочіння добре видно, що кількість рекристалізованих зерен після ПС+В порівняно з СТ+В менша. Збільшується кількість великих субструктурних зерен, а деформовані зерна також збільшуються у розмірах. Формується бімодальна структура, що складається з дуже дрібних зерен із висококутовими межами (сині рекристалізовані) та великих зерен із розвиненою субструктурою. Сині рекристалізовані зерна дуже дрібні, з висококутовими межами. Самі зерна як би окантовують сильно деформовані червоні зерна, що свідчить про протікання рекристалізації за механізмом зародка утворення від межі зерна, так як червоні зерна являють собою деформовані зерна з сильно напруженими кристалічною ґраткою. Загальна кількість сформованих у дроті після закінчення процесу волочіння малокутових кордонів склала 30% для СТ+В та 10% для ПС+В. Відповідно у дроті СТ+В сформовано 70% більшекутових кордонів, а ПС+В – 90%. Автори [12] спостерігали схоже розташування рекристалізованих обсягів біля меж зерен у деформованому нікелевому сплаві. Вони висловили цілком обґрунтовану думку, що зародки рекристалізації формуються в найбільш विकривлених ділянках кристалічних ґрат, тобто біля висококутових кордонів зерен. У нашому випадку найчастіше зародки дійсно знаходяться поблизу висококутових кордонів зерен, але іноді дрібні зернисті рекристалізовані спостерігаються також і в обсязі деформованих зерен з субструктурою. У цьому випадку можна припустити, що рекристалізовані зерна сформувалися з декількох субзерен, що прилягають один до одного, шляхом розвитку механізму механоіндукованої рекристалізації.

На прикладі субструктурних (жовтих) зерен є зручним проілюструвати механізм механоіндукованої рекристалізації. У полі зерна спостерігаються субкордони, але частина їх обірвані, не замикаються, і оточені мало перекрученим обсягом зерна з малою щільністю дефектів. Такі жовті зерна мають зовнішні добре сформовані кутові межі. Таким чином, ми спостерігаємо характерні особливості структури металу: а) неоднорідність субструктури за обсягом металу і всередині окремих зерен, пов'язана з тим, що одні ділянки щойно рекристалізовані, а раніше рекристалізовані ділянки зазнали наклепу та динамічного повернення; б) нерівність, зубчастість меж зерен, викликана викиданням «мов» при зародженні нових зерен; в) поява колоній нових зерен переважно біля меж вихідних кристалів; г) рівноосність зерен (на відміну витягнутих зерен на стадії динамічного повернення).

У літературі такі особливості структури обговорюють, розглядаючи стадії динамічної рекристалізації у разі гарячої прокатки [13-14] чи холодної прокатки [15]. У нашому випадку ми спостерігаємо низькотемпературну механоіндуковану рекристалізацію під час волочіння, яка і проводить до деякого збільшення розміру зерен, таким чином частково відновлюючи пластичність. Отже, при ПС+В розвиваються два конкурентні механізми: фрагментація та релаксація типу рекристалізації. Вона проходить по двох механізмах: механізму зростання зародка від межі зерна та механоіндукованої рекристалізації. Тому не спостерігається очікуваного значного подрібнення зерен. Цікавим є той факт, що, як можна було б очікувати, при цьому не відбувається втрата рівня міцності. Найімовірніше це пояснюється тим, що у разі ПС+В частка сформованих висококутових кордонів становила 90%. Саме ці межі дозволяють зберегти рівень властивостей міцності. Процеси механоіндукованої рекристалізації при цьому забезпечують підвищення провідності ПС-дроту на етапі волочіння через розвиток процесів заліковування мікропор. Очевидно, це пояснює той факт, що катанка, отримана за ПС-технологією, показала низьку обривність при волоченні дроту з великими ступенями деформації без проміжної пом'якшувальної обробки. Можна припустити, що це пов'язано з певною організацією дефектів при прокатці зі зсувом за рахунок створення додаткових напружень при прокатці. У класичній роботі [16] сформульовано думку, що динамічна рекристалізація виникає як результат складної взаємодії ротаційної та міграційної рекристалізації. Очевидно, такий підхід можна застосувати і для нашого випадку використання прокатки зі зсувом. Таким чином, основним механізмом, що відповідає за формування структури та властивостей на етапі прокатки є для СТ-технології-полігонізація, а для ПС-технології - рекристалізація. На етапі холодного волочіння картина міняється. Для СТ+В основними механізмами структуроутворення стає фрагментація, а для ПС+В фрагментація, що змінюється механоіндукованою рекристалізацією. Такий сценарій розвитку



структури відповідальний за більш високі значення провідності та щільності дроту після прокатки зі зсувом та волочіння в порівнянні зі стандартною прокаткою та волочінням внаслідок розвитку процесів заліковування мікропор.

### Висновки

1. Встановлено, що після прокатки зі зсувом одержуваний метал характеризується більш дрібнодисперсною, рівноосною, ізотропною структурою зі зниженою щільністю малокутових кордонів у тілі зерен порівняно з металом після стандартної прокатки.

2. Показано, що при подальшому волоченні катанка, отримана за технологією прокатки зі зсувом, має більшу пластичність у порівнянні з катанкою, отриманою за стандартною технологією. Катанка, отримана за технологією прокатки зі зсувом, дозволила проволочити дріт до діаметра 1,96 мм без проміжних відпалів, що дало змогу заощадити час та гроші на проміжних відпалах.

3. Дослідження показали, що після прокатки зі зсувом, поєднаної з волоченням, немає поетапного подрібнення зерен зі зростанням ступеня деформації, так як це спостерігається при стандартній прокатці з волочінням. Натомість реалізується чергування фрагментації та низькотемпературної механоіндукованої рекристалізації.

4. Встановлено, що механоіндукована низькотемпературна рекристалізація відбувається за двома механізмами зародка утворення: зростання зародка від напружених меж зерен та зростання зародка шляхом злиття сусідніх субзерен усередині зерна.

5. Проведені дослідження підтверджують, що технологія прокатки зі зсувом має великі потенційні переваги завдяки ефективному управлінню структурою та механічними властивостями матеріалів.

### Література

1. Horita Z. Severe Plastic Deformation for Nanostructure Controls / Z. Horita, K. Edalati // *Materials transactions*. – 2020. - Volume 61, Issue 11. – P. 2241-2247. - DOI <https://doi.org/10.2320/matertrans>.

2. Azushima A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals / A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida // *CIRP Annals*. – 2008. - Volume 57, Issue 2. - P. 716-735. - <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.

3. Zavdoveev A. Shear impact during steel wire drawing on grain boundaries and mechanical properties / Zavdoveev A., Baudin T., Rogante M., Pashynska E., Skoryk M. // *Letters on Materials*. - 2020. – Volume 10. Issue 4. - P. 558-565. - <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-4-558-565>.

4. Zhilyaev A. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications / A. P. Zhilyaev and T. G. Langdon // *Progress in Materials Science*. – 2008. - Volume 53. Issue 6. – P. 893–979. - <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>.

5. Sha G. Influence of Equal-Channel Angular Pressing on Precipitation in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy / G. Sha, Y. B. Wang, X. Z. Liao, Z.C. Duan, S.P. Ringer, T.G. Langdon // *Acta Materialia*. - 2009. – Volume 57. Issue 10. – P. 3123–3132. - <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.03.017>.

6. Пашинська О.Г. Фізико-механічні основи подрібнення структури при комбінованій пластичній деформації / О.Г. Пашинська. – Донецьк: Вебер, 2009. - 352 стр. - ISBN 978-966-335-282-4.

7. Деклараційний патент України №13768U, МПК В21В1/00. Спосіб одержання сортового прокату / О.Г. Пашинська, Д.П., Кукуй О.Г., Маншилін А.В., Феофілактов // заявл. 24.10.05; опубл. 17.04.06, Бюл. №4.опубл. 2006, Бюл. № 4. – 5 с.

8. Варюхін В.М. Можливості методу дифракції зворотнорозсіяних електронів для аналізу структури деформованих матеріалів / В.М. Варюхін, О.Г. Пашинська, А.В. Завдовеев, В.В. Бурховецький. - Київ: Наукова думка, 2014. - 104 стр. - ISBN 978-966-00-1400-8.

9. Мішков Ю.Я. Руйнування деформованої сталі / Ю.Я. Мішков, Т.М. Сердітова. – Київ: Наукова думка, 1989. – 160 с.

10. Матвеев А. Н. Електрика та магнетизм / А. Н. Матвеев. - Москва: Вища школа, 1983. – 463 с.

11. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство / В. В. Попович, В. В. Попович. – Львів: Світ, 2006. – 624 с. - ISBN 966-603-452-2.

12. Метлов Л.М. В. Бездифузійна «рекристалізація» за великої одновісної деформації / Л.М. Метлов, А.В. Завдовеев // *Журнал нано- та електронної фізики*. - 2012. – Том 4 № 2. - С. 02013 (5). - <https://www.researchgate.net/publication/264507172>.

13. Podaný P. Recrystallization behaviour of a nickel-based superalloy / P. Podaný, Z. Novy, J. Dlouhy // *Materials and Technologies*. – 2016/- Volume 50. Issue 2. - P.199-205. - DOI:10.17222/mit.2014.163.

14. Богатов А.А. Ресурси пластичності металів під час обробки тиском. / А.А. Богатов, О.І. Мижирицький. С.С. Смирнов. - Москва: Металургія, 1988. – 452 с.

15. Pashynska O. Forming of properties complex of copper wire by the method of combined deformation by torsion and tension / Pashynska O., Pashynskiy V., Kraliuk M., Boyko I. *Technology // Audit and Production Reserves*. – 2022. -Volume 1. Issue 1(63). - P.16-22. - <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252282>.

16. Пуар'е Ж.П. Повзучість кристалів. - Ж.П. Пуар'е. - Москва: Мир, 1988. - 287 с.

## References

1. Horita Z. Severe Plastic Deformation for Nanostructure Controls / Z. Horita, K. Edalati // *Materials transactions*. – 2020. - Volume 61, Issue 11. – P. 2241-2247. - DOI <https://doi.org/10.2320/matertrans>.
2. Azushima A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals / A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida // *CIRP Annals*. – 2008. - Volume 57, Issue 2. - P. 716-735. - <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.
3. Zhdovtsev A. Shear impact during steel wire drawing on grain boundaries and mechanical properties / Zhdovtsev A., Baudin T., Rogante M., Pashynska E., Skoryk M. // *Letters on Materials*. - 2020. – Volume 10. Issue 4. - P. 558-565. - <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-4-558-565>.
4. Zhilyaev A. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications / A. P. Zhilyaev and T. G. Langdon // *Progress in Materials Science*. – 2008. - Volume 53. Issue 6. – P.893–979. - <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>.
5. Sha G. Influence of Equal-Channel Angular Pressing on Precipitation in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy / G. Sha, Y. B. Wang, X. Z. Liao, Z.C. Duan, S.P. Ringer, T.G. Langdon // *Acta Materialia*. - 2009. – Volume 57. Issue 10. – P. 3123–3132. - <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.03.017>.
6. Pashynska O.H. Physico-mechanical bases of structure grinding during combined plastic deformation / O.H. Pashynska - Donetsk: Weber, 2009. - 352 pages - ISBN 978-966-335-282-4.
7. Declaration patent of Ukraine No. 13768U, IPC B21B1/00. The method of obtaining graded rolled steel / O.G. Pashynska, D.P., Kukui, O.G., Manshilin, A.V., Feofilaktov // application. 24.10.05; published 04/17/06, Bul. No. 4. publ. 2006, Bull. No. 4. – 5 p.
8. Varyukhin V.M. Possibilities of the backscattered electron diffraction method for analyzing the structure of deformed materials / V.M. Varyukhin, O.G. Pashynska, A.V. Zhdovtsev, V.V. Burkhovetskyi. - Kyiv: Naukova dumka, 2014. - 104 pages - ISBN 978-966-00-1400-8.
9. Yu. Ya. Mishkov. Destruction of deformed steel / Yu.Ya. Mishkov, T.M. Serditova. - Kyiv: Naukova dumka, 1989. - 160 p.
10. Matveev A. N. Electricity and magnetism / A. N. Matveev. - Moscow: Higher School, 1983. – 463 p.
11. Popovych V. V. Technology of structural materials and materials science / V. V. Popovych, V. V. Popovych. - Lviv: Svit, 2006. - 624 p. - ISBN 966-603-452-2.
12. L.M. Metlov. V. Diffusion-free "recrystallization" under large uniaxial deformation / L.M. Metlov, A.V. Zhdovtsev // *Journal of nano- and electronic physics*. - 2012. - Volume 4 No. 2. - P. 02013 (5). - <https://www.researchgate.net/publication/264507172>.
13. Podaný P. Recrystallization behaviour of a nickel-based superalloy / P. Podaný, Z. Nový, J. Dlouhý // *Materials and Technologies*. – 2016/- Volume 50. Issue 2. - P.199-205. - DOI:10.17222/mit.2014.163.
14. Bogatov A.A. Plasticity resources of metals during pressure treatment. / A.A. Bogatov, O.I. Myzyrskyi. S.S. Smirnov. - Moscow: Metallurgy, 1988. – 452 p.
15. Pashynska O. Forming of properties complex of copper wire by the method of combined deformation by torsion and tension / Pashynska O., Pashynskyi V., Kraliuk M., Boyko I. *Technology // Audit and Production Reserves*. – 2022. -Volume 1. Issue 1(63). - P.16-22. - <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252282>.
16. Poirier J.P. Crystal creep. - Zh.P. Poirier. - Moscow: Mir, 1988. - 287 p.