

О. В. Грушко¹
В. А. Огородніков¹
Ю. О. Слободянюк²

ДЕФОРМОВНІСТЬ МАЛОВУГЛЕЦЕВОГО ДРОТУ В ПРОЦЕСІ ЙОГО БАГАТОСТУПІНЧАСТОГО ХОЛОДНОГО ВОЛОЧІННЯ

¹Вінницький національний технічний університет;

²ПрАТ «ПлазмаТек»

Метою роботи є виконання аналізу розподілу деформацій по перерізу, особливостей шляхів деформування, а також здійснення оцінки деформовності дроту з типових для сучасного ринку маловуглецевих сталей G3Si1 та Св-08Г2С в процесі його багатоступінчастого волочиння. Для аналізу вибрано один з типових технологічних процесів волочиння з 16-ма переходами, що використовується у виробництві дроту діаметром 0,8 мм з катанки діаметром 5,5 мм. Цей процес реалізовано в реальному виробництві в умовах ПрАТ «ПлазмаТек». Аналіз механіки процесу волочиння здійснено за допомогою методу скінчених елементів. Оцінка деформовності виконувалась з використанням критерію В. А. Огороднікова, що враховує нелінійний характер накопичення пошкоджень, особливості шляхів деформування у вигляді похідних, а також показник напруженого стану, який враховує третій інваріант тензора напружень (об'ємність напруженого стану). Виконано аналіз розподілу деформацій по перерізу через представлення їх у відносних одиницях. Показано, що графіки розподілу деформацій по перерізу практично збігаються для різних переходів та діаметрів заготовок. Коефіцієнт нерівномірності деформацій практично не залежить від кількості переходів та ступеня витягування і сягає 0,87. Проаналізовано шляхи деформування в небезпечній області (на осі дроту) для них характерна значна зміна похідної та кривини траєкторії деформацій. З'ясовано, що напружений стан є об'ємним, а показники, що відображають третій інваріант тензора напружень, зокрема, параметр Надаї–Лоде, практично не змінюються під час волочиння. Побудована обчислювальна схема, що дозволяє врахувати третій інваріант тензора напружень відповідно до критерію деформовності В. А. Огороднікова та оцінити вплив цього інваріанту на деформовність маловуглецевого зварювального дроту в процесі його волочиння в існуючих на практиці маршрутах волочиння і здійснити в подальшому на цій основі оцінку технологічної спадковості у вигляді залишкової пластичності, твердості тощо.

Ключові слова: деформовність, волочиння, діаграма пластичності, показник напруженого стану, деформація, маловуглецевий дріт.

Вступ

На сьогодні використання зварювального маловуглецевого дроту для виготовлення різноманітних сталевих конструкцій зростає. Відповідно виробники зварювального дроту збільшують свої виробничі потужності за рахунок великого попиту на свою продукцію [1].

Основним процесом виробництва дроту марок G3Si1 та Св-08Г2С є процес волочиння з катанки діаметром 6,5 або 5,5 мм до необхідного діаметра 1,6; 1,2; 1,0 або 0,8 мм [2]. Сучасна технологія виробництва маловуглецевого дроту не передбачає операції проміжного відпалу, що дозволяє скоротити процес виробництва та збільшити його продуктивність. У зв'язку з цим висувуються чіткі вимоги до катанки та виникає гостра необхідність у максимальному використанні пластичності матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С з метою розробки раціональної технології виробництва дроту цих марок.

Значного поширення набули принципи побудови маршруту волочиння, де використовують середню витяжку за кожний прохід. Для зручності розрахунку таких маршрутів побудовані номограми, які описані у роботах [3]–[5]. Недоліками таких принципів побудови маршруту є нераціональне використання потужності виробничого обладнання, відсутність врахування механічних характеристик матеріалу, що є дуже важливим питанням, коли встановлені вимоги до механічних властивостей готового дроту.

У роботі [5] пропонують розрахунок маршрутів волочіння на основі критерію руйнування Кок-рафта–Латама, але очевидним його недоліком є наявність всього однієї константи матеріалу, яка визначає пластичність, що, очевидно, не достатньо для коректної оцінки деформовності при значних пластичних деформаціях. Детальніший огляд недоліків цього та інших подібних до нього критеріїв розглянуто в [9], [10].

Феноменологічна теорія деформовності є ефективним інструментом аналізу щодо забезпечення безвідмовності процесу волочіння та виготовлення зварювального дроту належної якості [6]. Проте, щоб коректно скористатись нею важливо здійснити відповідний аналіз процесу та вибрати раціональний критерій деформовності. Найзагальнішим скалярним критерієм автори вважають вираз, отриманий В. А. Огородніковим [7]

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \left(1 + 0,2 \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right) \right) \frac{e_u^{0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u}}}{[e_p(\eta, \chi)]^{1+0,2 \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right)}} de_u \leq 1. \quad (1)$$

Цей критерій ґрунтується на нелінійній теорії накопичення пошкоджень та може бути застосований для процесів, в яких історія деформування характеризується траєкторіями, для яких похідні $\frac{d\eta}{de_u}$, $\frac{d\chi}{de_u}$ набувають значних величин. В критерії використовуються безрозмірні показники напруженого стану, що складаються з інваріантів тензора чи девіатора напружень:

– показник жорсткості напруженого стану η

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}; \quad (2)$$

– показник, що враховує третій інваріант тензора напружень χ

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_u} \quad (3)$$

або альтернативний йому показник μ_σ (параметр Надаї–Лоде)

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (4)$$

В роботах [6]—[8] досліджувались питання оцінки деформовності, але використання запропонованих в цих роботах методів не дає можливості з необхідною для практики точністю визначити граничні технологічні параметри процесу багатоступінчастого волочіння. В роботах [9]—[10] досліджується оцінка деформовності процесів гарячого пластичного деформування, тому для процесу волочіння це також не може бути використано. Зокрема, в роботі [6] досліджено шляхи деформування (рис. 1) і наведена методика оцінки деформовності при волочінні, але, як показують розрахунки, зокрема для процесу волочіння маловуглецевого сталевого дроту, мають місце значні відхилення розрахунків та експериментальних даних, особливо, коли кількість переходів сягає більше 10. Похибка в деяких випадках сягає 200 % і більше. Це може бути пов'язано з низкою причин. По-перше, дослідження напружено-деформованого стану (а отже і шляхів деформування, як наслідок його обробки та аналізу) виконувались із застосування наближених теоретичних підходів, які не здатні, зокрема, оцінити нерівномірність деформацій в перерізі. По-друге, для оцінки деформовності не враховано вплив об'ємності напруженого стану на пластичність та кривину шляхів деформування. По-третє, технологічний паспорт матеріалу дроту важливо визначити для конкретної партії напівфабрикату. І нарешті, в таких методиках важко враховувати всі особливості перебігу багатоступінчастого волочіння, в т. ч. набути деформаційну анізотропію.

Практика показує, що ні виробники технологічного обладнання для виробництва дроту, ні безпосередньо виробники готової продукції не налаштовані на впровадження суттєвих змін в відпрацьованих десятиріччями існуючих маршрутах волочіння та принципах реалізації технологічного процесу, зокрема, пов'язаних зі зміною конструкції волок. Отже дослідження слід проводити для тих технологічних режимів, які набули широкого поширення у виробничій практиці [11]. Заува-

жимо, що для аналізу механіки процесу волочіння раціонально скористатись методом скінчених елементів (МСЕ), як одним з найефективніших. для дослідження процесів холодного пластичного деформування.

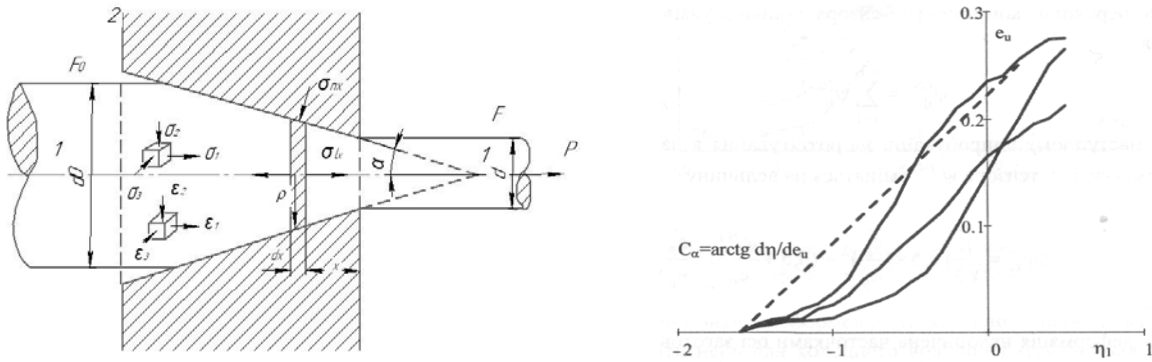


Рис. 1. Схема волочіння дроту суцільного перерізу та шляхи деформування частинок матеріалу на осі під час волочіння [6]

Мета роботи — виконати аналіз розподілу деформацій по перерізу та особливостей шляхів деформування, а також здійснити оцінку деформовності дроту з маловуглецевих сталей в процесі його багатоступінчастого волочіння для характерного технологічного процесу.

Результати дослідження

Для отримання найповнішої інформації щодо механіки процесу багатоступінчастого волочіння маловуглецевого дроту за типовим для виробництва технологічним процесом (табл. 1) здійснено його моделювання за допомогою МСЕ з урахуванням реальної карти матеріалу G3Si1 [12] (рис. 2).

Таблиця 1

Досліджений маршрут волочіння

Параметри маршруту	Вхідний діаметр катанки, мм	Швидкість волочіння, м/с	№ блока								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Попереднє волочіння											
Діаметр дроту, мм	5,5	8...14	4,68	3,99	3,42	2,95	2,56	2,24	1,98	—	—
Обтиснення, %			27,6	27,31	26,53	25,60	24,69	23,44	21,87	—	—
Кут волоки, град			12	12	12	12	12	12	12	—	—
Фінішне волочіння											
Діаметр дроту, мм	1,98	20...24	1,73	1,52	1,34	1,19	1,07	0,98	0,9	0,83	0,77
Обтиснення, %			25,18	22,80	22,28	21,14	19,15	16,11	15,66	14,95	13,94
Кут волоки, град			12	12	9	12	12	9	9	9	9

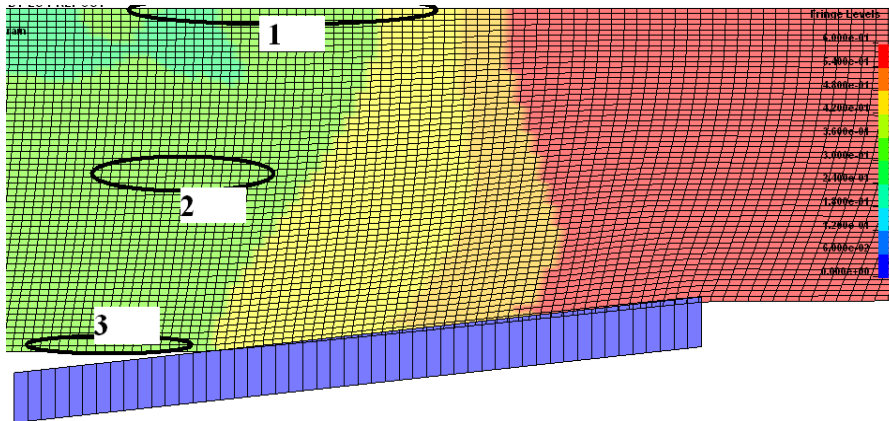


Рис. 2. Моделювання волочіння МСЕ (прохід через другу волоку, розподіл накопиченої інтенсивності деформацій). Характерні зони, для яких вивчались шляхи деформування

Після виконання відповідної обробки отриманих результатів представимо розподіл інтенсивності накопичених деформацій по перерізу дроту на різних етапах волочіння (рис. 3). Для наочності сприйняття рисунку показані лише 5 етапів волочіння (з діаметра 5,5 до 2,5 мм, для інших етапів графіки мають подібний характер)

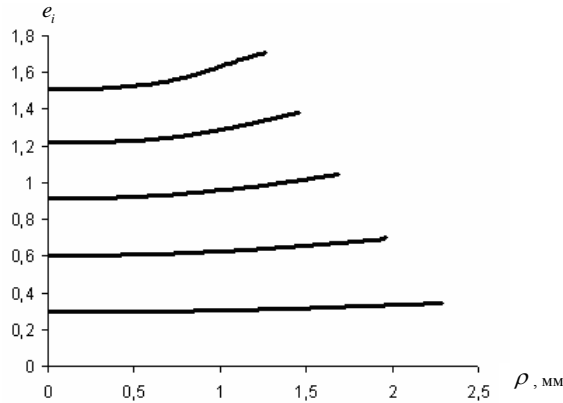


Рис. 3. Розподіл деформацій по перерізу на перших 5-ти етапах волочіння (5,5→4,68→3,99→3,42→2,95→2,56 (діаметр), мм)

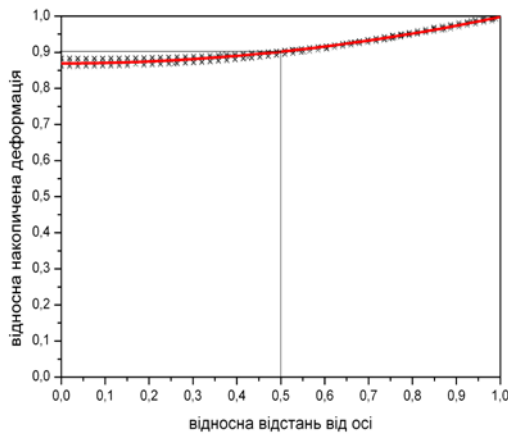


Рис. 4. Розподіл відносної накопиченої інтенсивності деформацій в залежності від відносної

$$\text{радіальної координати } \bar{\rho} = \frac{\rho}{r_0}$$

величина сягає 0,9 від максимальної на поверхні — $\bar{e}_{im} = 2\ln \frac{d_0}{d_n} / e_{1n} = 0,9$. Це дозволяє з використанням класичних формул визначення накопиченої інтенсивності деформацій визначати величину e_i на осі, поверхні і в довільній точці дроту в його поперечному перерізі на n -му переході, зокрема

$$e_{\max} = 1,11 \cdot 2\ln \frac{d_0}{d_n}; \tag{6}$$

$$e_{\min} = 0,96 \cdot 2\ln \frac{d_0}{d_n}. \tag{7}$$

Коефіцієнт нерівномірності деформацій для дослідженого маршруту волочіння становить $m = 0,87$. Для маршрутів волочіння, які суттєво відрізняються за своїми технологічними параметрами від дослідженого, необхідно виконувати додаткове вивчення щодо значення m , проте отримані загальні формули за своєю структурою не зазнають змін, що може бути використано як в практичному, так і теоретичному аспекті подальшого використання отриманих результатів.

Тому, використовуючи теоретичний аналіз, варто зауважити, що дійсні деформації на осі, за якими оцінюється деформовність, будуть менші (в 0,97 раз від середньологарифмічних), а на поверхні в 1,11 раз більші. При цьому, коли ступінь накопичених деформацій сягає, наприклад, 4-х (характерно для процесу волочіння маловуглецевого дроту), то дійсні деформації на осі і на пове-

Віднесемо абсцису розрахункових точок отриманих графіків до поточного діаметра на певному етапі волочіння, а ординату — до деформації на поверхні. В результаті отримуємо розташування розрахункових точок близько до кривої, характер якої носить вигляд параболи (рис. 4). Апроксимуємо експериментальні точки функцією

$$\bar{e}_i = \bar{e}_0 + (1 - \bar{e}_0) \cdot \bar{\rho}^2 = m + (1 - m) \cdot \bar{\rho}^2, \tag{5}$$

де $\bar{e}_0 = \frac{e_{0n}}{e_{1n}} = \frac{e_{\min}}{e_{\max}} = m = 0,87 \pm 0,001$ — коефіцієнт нерівномірності деформацій, практично не залежить від кількості переходів та ступеня витягування; e_{0n} — накопичена інтенсивність деформацій на осі дроту на n -му переході; e_{1n} — накопичена інтенсивність деформацій на поверхні дроту на n -му переході; $\bar{e}_i = \bar{e}_{in} = \frac{e_{in}}{e_{1n}}$ — відносна накопичена інтенсивність деформацій в точці, відносна координата якої по радіусу дорівнює $\bar{\rho} = \frac{\rho_n}{r_{0n}} = \frac{2\rho_n}{d_{0n}}$.

Зауважимо, що функція (5) досить точно описує відповідний розподіл — скоригований коефіцієнт детермінації складає $R_{adj} = 0,98$.

Також відмітимо, що незалежно від кількості переходів та ступеня витягування середня деформація спостерігається на відстані $\bar{\rho}_m = \frac{\rho}{r_0} = 0,5$ і її

рхні будуть 3,9 і 4,44, що є суттєво для призначення граничних режимів волочіння з максимальним ступенем витягування.

Для оцінки деформовності в процесі волочіння побудуємо шляхи деформування в небезпечній області, яка знаходиться на осі дроту (підтверджується експериментально для різних умов волочіння). Для наочності і порівняння покажемо також шляхи деформування точок на поверхні і на

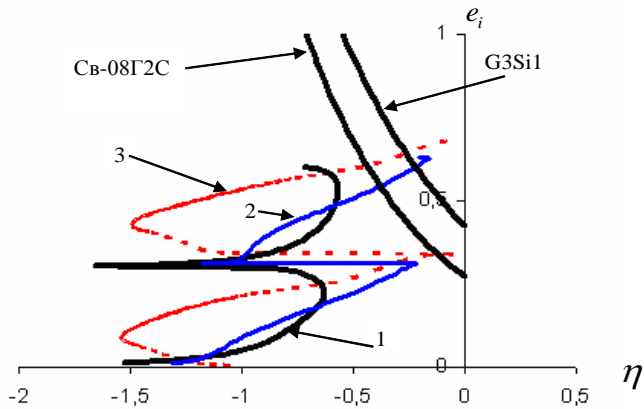


Рис. 5. Шляхи деформування в зонах 1–3 (див. рис. 2) для 2-х перших переходів волочіння та діаграми пластичності матеріалу дроту марок G3Si1 та Sv-08Г2С

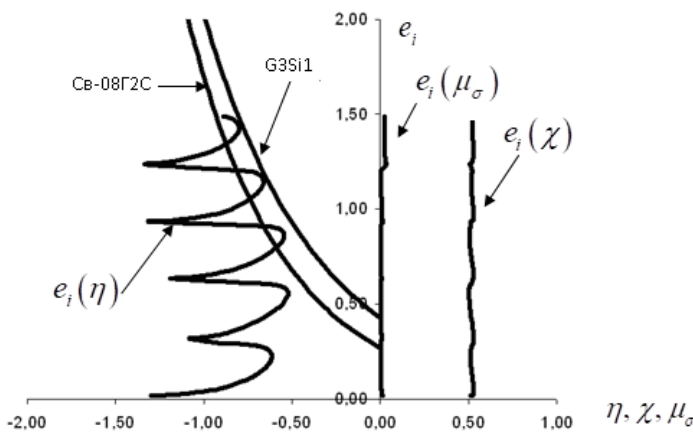


Рис. 6. Шляхи деформування частинок матеріалу в небезпечній області (на вісі) (перші 5 переходів) та діаграми пластичності матеріалів

відстані 0,5 радіуса від поверхні зразка (рис. 5).

Як випливає з рис. 5, отримані шляхи деформування значно відрізняються від тих, що були досліджені в роботах [6]—[8]. (див. рис. 1). Це вносить суттєві корективи в оцінку деформовності в процесі волочіння з використанням відповідних критеріїв. Також зауважимо, що характерною особливістю шляхів деформування в небезпечній області є їх значна кривина, при суттєвих значеннях першої похідної, яка до того ж змінює знак $\left(\frac{d\eta}{de_u} = -15\dots 9\right)$.

Побудуємо також шляхи деформування як функції зміни величини накопиченої інтенсивності деформацій від показника $e_i(\chi)$ та параметра Надаи–Лоде $e_i(\mu_\sigma)$ (рис. 6). Як зазначено у вступі, така інформація є важливою з точки зору вибору критерію деформовності. Оскільки небезпечна область припадає на вісь дроту, що волочать, то графіки побудовано для цієї зони заготовки. Як видно з рисунку, характерною особливістю цих графіків є практично лінійна залежність та незмінність цих параметрів в ході процесу багатоступінчастого волочіння. Це означає, що враховувати першу і другу похідну шляхів деформування $e_i(\chi)$ чи $e_i(\mu_\sigma)$ не потрібно. З іншого боку врахувати зміну пластичності металу (діаграму пластичності) при $\chi \neq 0$ є важливим, як показано

в роботі [7].

Отже, оцінку деформовності дроту в процесі багатоступінчастого волочіння необхідно здійснювати за критерієм (1).

У відповідності до методики врахування третього інваріанту тензора напружень при оцінюванні деформовності (В. А. Огородніков) діаграма пластичності втрачає наочність сприйняття у вигляді графіка. Запишемо функцію, яка буде її визначати, з урахуванням даних роботи [6]

$$\eta_\chi(e_i) = \eta(e_i) \left[1 + (A \cdot \eta^2(e_i) + B \cdot \eta(e_i) + C) \chi \right], \quad (8)$$

або, коли $\chi = 0,5$

$$\eta_\chi(e_i) = \eta(e_i) \left[1 + 0,5(A \cdot \eta^2(e_i) + B \cdot \eta(e_i) + C) \right]. \quad (9)$$

У таблиці 2 наведено результати, які дає оцінювання використаного ресурсу пластичності, з урахуванням властивості адитивності використаного ресурсу пластичності $\psi = \sum \psi_i$ (зауважимо, що процес деформації монотонний та складний). Як видно з розрахунків, оцінку деформовності

необхідно виконувати з урахуванням третього інваріанта тензора напружень, в іншому випадку похибка може сягати значних величин. Також зауважимо, що зміна режимів волочіння чи матеріалу тягне за собою необхідність щоразу здійснювати доволі трудомістке та незручне в умовах виробництва моделювання процесу МСЕ та обробку даних, а також ретельного вивчення діаграми пластичності для конкретного оброблюваного волочінням матеріалу. Це спонукає до пошуку простіших інженерних підходів, що ґрунтуються, зазвичай на феноменологічній основі [11].

Таблиця 2

Оцінка використаного ресурсу пластичності при волочінні

Матеріал	Використаний ресурс пластичності, визначений без урахування третього інваріанта тензора напружень	Використаний ресурс пластичності, визначений з урахуванням третього інваріанта тензора напружень	Примітки
G3Si1	1,83	0,92	Обривність відсутня
Св-08Г2С	2,34	1,11	Висока обривність

Висновки

Вивчення деформацій по перерізу раціонально здійснювати через представлення їх у відносних одиницях, оскільки графіки для різних переходів та діаметрів заготовок практично збігаються. Коефіцієнт нерівномірності деформацій практично не залежить від кількості переходів та ступеня витягування і становить 0,87.

Шляхи деформування в небезпечній області (на осі) мають інший вигляд, ніж вважалось раніше, при цьому спостерігається значна зміна похідної та кривини траєкторій деформування. Шляхи деформування, побудовані через показники χ та μ_{σ} мають вигляд майже константи, що значно спрощує їх врахування для оцінювання деформовності в процесі волочіння.

Побудована обчислювальна схема, що дозволяє врахувати третій інваріант тензора напружень відповідно до критерію деформовності (1) та оцінити вплив цього інваріанта на деформовність маловуглецевого зварювального дроту в процесі його волочіння в існуючих на практиці маршрутах волочіння і здійснити в подальшому на цій основі оцінку технологічної спадковості у вигляді залишкової пластичності, твердості тощо.

В подальших дослідженнях становить інтерес порівняння отриманих результатів оцінки деформовності з результатами, що можуть бути отримані на основі застосування тензорного критерію деформовності [13] та критерію, який враховує особливості високотемпературного деформування [14].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. В. Парусов, А. Б. Сычков и Э. В. Парусов, *Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки*. Днепропетровск, Украина: АРТ-ПРЕСС, 2012.
- [2] В. П. Костюченко, М. А. Таранец, З. А. Дегтяренко, С. А. Шамин и В. Д. Кузяков, «Особенности производства сварочной омедненной проволоки Св-08Г2С», *Метизы*, № 2 (18), с.60-63, 2008.
- [3] А. М. Должанский и Н. Н. Очеретная, «Определения маршрутов волочения при уменьшении интенсивности упругости проволоки», *Металлургическая и горнорудная промышленность*, № 2, с. 60-62, 2008.
- [4] С. М. Головизин, Д. С. Терских, В. А. Харитонов и Л. Э. Пыхов, «Влияние кратности и скорости волочения на качество высокоуглеродистой проволоки», *Сталь*, № 11, с. 46-48, 2016.
- [5] В. А. Харитонов и А. Ю. Столяров, *Совершенствование технологии производства высокопрочной проволоки для армирующих материалов автомобильных шин*. Магнитогорск, Россия: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2016.
- [6] В. А. Огородников, Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. К., СРСР: УМК ВО, 1989.
- [7] В. А. Огородников, А. В. Грушко и А. В. Гуцалюк, «Выбор критериев деформируемости при оценке использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 43 (1086), с. 127-136, 2014.
- [8] В. А. Огородников, О. Ю. Слівак та О. В. Грушко, *Деформація волочінням і фізико-механічні властивості тонких термомарних дротів*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014.
- [9] В. М. Михалевич, *Тензорні моделі накопичення пошкоджень*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998.
- [10] В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк та О. В. Краєвський, «Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій», *Вісник машинобудування та транспорту*, № 2 (8), с. 56-64, 2018.

- [11] A. V. Grushko, V. V. Kukhar and Y.O. Slobodyanyuk, "Phenomenological model of low-carbon steels hardening during multistage drawing," *Solid State Phenomena*, vol. 265, pp. 114-123, 2017.
- [12] О. В. Грушко та Ю. О. Слободянюк, «Механічні характеристики сталей G3Si1 та СВ-08Г2,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4 (139), с. 103-109, 2018.
- [13] В. М. Михалевич та Ю. В. Добранюк, *Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013.
- [13] V. Kraievskiy, V. Mykhalevych, Y. Dobranyuk, D. Sawicki and K. Mussabekov, "Selection of optimal path of strain rate change in the process of multistage hot deformation under the condition of the equal duration of stages," *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, Proc. SPIE 10808, 2018.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.06.2019

Грушко Олександр Володимирович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри опору матеріалів та прикладної механіки, e-mail: grushko1alex@gmail.com ;

Огородніков Віталій Антонович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри опору матеріалів та прикладної механіки, e-mail: va.ogorodnikow@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця ;

Слободянюк Юлія Олегівна — інженер-технолог, e-mail: yuliya_slobodyanyuk@ukr.net .

ПрАТ «ПлазмаТек», Вінниця

O. V. Grushko¹
V. A. Ogorodnikov¹
Yu. O. Slobodianiuk²

Deformation of Low-Carbon Wire in the Process of its Multistage Cold Drawing

¹Vinnytsia National Technical University;

²PJSC "PlasmaTec"

The aim of the work is to analyze the distribution of deformations over the cross section, features of the deformation paths, also is carried out the assessment of wire deformability from low carbon steels typical for the modern market G3Si1 and Sv-08G2S during its multistage cold drawing. For the analysis, one of the typical technological processes of drawing with 16 transitions was selected, which is aimed at the production of wire with a diameter of 0.8 mm from a rod of diameter 5.5 mm. This process is implemented in real production in the PJSC "PlasmaTek" environment. The mechanics of cold drawing process are carried out using the finite element method. The evaluation of deformability was performed using the V. Ogorodnikov criterion, which takes into account the nonlinear nature of damage accumulation, the features of deformation paths in the form of derivatives, as well as the stress state indicator, taking into account the third invariant of the stress tensor (volume of the stress state). The analysis of the distribution of deformations in the section through their representation in relative units carried out. It is shown that the graphs of the distribution of strains over the cross section practically coincide for different transitions and diameters of the workpieces. The coefficient of non-uniformity of deformations practically does not depend on the number of transitions and the degree of stretching and reaches 0, 87. The deformation paths in the hazardous area — on the axis of the wire — are analyzed — they are characterized by a significant change in the derivative and curvature of the deformation territory. It is established that the indicators of the stress state, taking into account the volume of the stress state (in particular, the parameter Nadai–Lode) practically do not change during cold drawing. Considering at third invariant of the stress tensor with the appropriate deformability criterion makes it possible to correctly evaluate the deformability of low-carbon welding wire in its drawing process in existing drawing practices and to further implement on this basis the assessment of technological heredity in the form of residual plasticity, hardness, and ect.

Keywords: deformability, cold drawing, plasticity diagram, stress state indicator, deformation, low carbon wire.

Grushko Oleksandr V. — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Materials Resistance and Applied Mechanics, e-mail: grushko1alex@gmail.com ;

Ogorodnikov Vitalii A. —Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Resistance of Materials and Applied Mechanics, e-mail: va.ogorodnikow@gmail.com ;

Slobodianiuk Yuliia O. — Processing Engineer, e-mail: yuliya_slobodyanyuk@ukr.net

А. В. Грушко¹
В. А. Огородников¹
Ю. О. Слободянюк²

Деформируемость малоуглеродистой проволоки в процессе ее многоступенчатого холодного волочения

¹Винницкий национальный технический университет;

²ЧАО «ПлазмаТек»

Целью работы является анализ распределения деформаций по сечению, особенностей путей деформирования, а также оценка деформируемости проволоки из типичных для современного рынка малоуглеродистых сталей G3Si1 и Sv-08Г2С в процессе ее многоступенчатого волочения. Для анализа выбран один из типовых технологических процессов волочения с 16-ю переходами, используемый в производстве проволоки диаметром 0,8 мм из катанки диаметром 5,5 мм. Этот процесс реализован на реальном производстве в условиях ЧАО «ПлазмаТек». Анализ механики процесса волочения осуществлен с помощью метода конечных элементов. Оценка деформируемости выполнялась с использованием критерия В. А. Огородникова, учитывающим нелинейный характер накопления повреждений, особенности путей деформирования в виде производных, а также показатель напряженного состояния, учитывающий третий инвариант тензора напряжений (объемность напряженного состояния). Выполнен анализ распределения деформаций по сечению посредством представления их в относительных единицах. Показано, что графики распределения деформаций по сечению практически совпадают для различных переходов и диаметров заготовок. Коэффициент неравномерности деформаций практически не зависит от числа переходов и степени извлечения и достигает 0,87. Проанализированы пути деформирования в опасной области (на оси проволоки), для них характерно значительное изменение производной и кривизны траектории деформаций. Установлено, что показатели напряженного состояния, учитывающие объемность напряженного состояния (в частности, параметр Надаи–Лоде) практически не изменяются во время волочения. Учет третьего инварианта тензора напряжений при соответствующем критерии деформируемости позволяет корректно оценивать деформируемость малоуглеродистой сварочной проволоки в процессе ее волочения в существующих на практике маршрутах волочения и осуществить в дальнейшем на этой основе оценку технологической наследственности в виде остаточной пластичности, твердости и т. п.

Ключевые слова: деформируемость, волочение, диаграмма пластичности, показатель напряженного состояния, деформация, малоуглеродистая проволока.

Грушко Александр Владимирович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, e-mail: grushko1alex@gmail.com ;

Огородников Виталий Антонович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и прикладной механики, e-mail: va.ogorodnikow@gmail.com ;

Слободянюк Юлия Олеговна — инженер-технолог, e-mail: yuliya_slobodyanyuk@ukr.net