

В.Г. Раздобреєв, канд. техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр. відділу процесів і машин обробки металів тиском,
e-mail: v_razdobreev@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7402-7992>

К.Ю. Ключніков, молод. наук. співр. відділу процесів і машин обробки металів тиском,
e-mail: kirill.shaman.k@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2465-3244>

О.І. Лещенко, молод. наук. співр. відділу процесів і машин обробки металів тиском,
e-mail: leschenko.a.73@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1877-8358>

Д.Г. Паламар, молод. наук. співр. відділу процесів і машин обробки металів тиском,
e-mail: damjan@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9503-3248>

О.П. Іванов, канд. техн. наук, доц., провід. інж. відділу процесів і машин обробки металів тиском,
e-mail: iva.dnp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1259-6377>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Формування напружень по висоті профілю стрічкового типу при його протягуванні через роликовий пристрій

Процес волочіння в роликових волоках є ефективним методом виробництва високоточних профілів стрічкового типу дрібних перерізів, поєднуючи переваги прокатки і волочіння. Основним інструментом є роликівна волока з непривідними робочими роликами. Порівняно зі звичайною холодною прокаткою та плющенням, цей процес має вищу технологічну гнучкість і не вимагає великих капіталовкладень. Переваги над традиційним волочінням в монолітних волоках — нижчі енергетичні витрати, більша допустима деформація за прохід і краща однорідність властивостей продукції. Головним недоліком є наявність тягового зусилля, що разом зі зниженням пластичності металу може спричинити руйнування прокату, обмежуючи сортамент профілів та сумарне обтиснення за один перехід. Пластичність металу можна підвищити термічним або механічним способом. Термічний спосіб енергоємний, тоді як механічний включає знакозмінне деформування профілів, що можна реалізувати за допомогою обладнання для рихтування або окалинозламувачів. Для розв'язання проблеми запропоновано поєднати волочіння в роликовій волоці зі знакозмінним деформуванням в роликовому згино-розтягувальному пристрої. Для вибору параметрів знакозмінної деформації застосовано математичне моделювання процесу з урахуванням впливу на розподіл напружень у профілі. Аналітичні дослідження на прикладі сталі марки Ст.08 показали, що залишкові напруження формуються через неоднорідність розподілу пластичних деформацій по висоті профілю. Після розвантаження на верхній поверхні утворюються стискаючі залишкові напруження, а на нижній — розтягувальні; в середині профілю напруження близькі до нуля, у інших частинах мають протилежні знаки. Отримані результати дозволяють визначати основні підходи до проектування технологічних параметрів процесу знакозмінної деформації профілів стрічкового типу в згино-розтягувальному пристрої, що забезпечить їх виробництво з високою якістю. Проведені дослідження свідчать про можливість вирішити проблему забезпечення машинобудівних і приладобудівних підприємств точними профілями широкого розмірного сортаменту.

Ключові слова: профілі стрічкового типу, волочіння, роликівна волока, згино-розтягувальний пристрій, знакозмінне деформування, напружено-деформований стан.

Вступ. Сучасний розвиток техніки неможливо уявити без застосування металовиробів з дроту, до якого висувають високі вимоги щодо різноманітності та якості, а до процесів виробництва дроту — гнучкості технології, високої ефективності та економічності, безпеки праці і автоматизації. Традиційно для виробництва продукції з дроту використовують процес волочіння в монолітних волоках. Однак при цьому основні недоліки такого процесу виявляються при чорнових операціях формозміни і полягають в порівняно низькій продуктивності, високих витратах на підготовку поверхні вихідної заготовки круглого перерізу, необхідності використання дорогих мастил, низької стійкості і високої трудомісткості виготовлення робочого інструменту. При виробництві фасонних профілів з дроту — це неможливість отримання тонкостінних профілів і профілів з малими радіусами закруглення, недостатнє опрацювання поперечного перерізу профілю, що деформується, отриманого ливарними методами.

В останні роки одним з найбільш перспективних і поширених процесів виробництва металовиробів з дроту є волочіння в прокатних клітках з непривідними валками — роликками (ці клітки отримали назву роликкових волок, клітей або голівок). В даний час роликкові волокни знаходять застосування при виробництві фасонних профілів високої точності різного призначення в широкому діапазоні профілерозмірів, при цьому найбільшого поширення вони набули при волочінні прямокутних, трапецієвидних та круглих профілів. Великий практичний інтерес, що проявляється до волочіння в роликкових волоках, обумовлений рядом переваг даного способу, що поєднує в собі особливості процесів прокатки і волочіння. Однак використання такого процесу обумовлює появу тя-

гового зусилля, яке обмежує асортимент профілів, що виготовляються за компактністю їх поперечного перерізу. Так, при виробництві профілів стрічкового типу з співвідношенням ширини до висоти понад 1,5—2 у зв'язку з наявністю напружень, що розтягують, змінюється напружено-деформований стан в об'ємі осередку деформації та зменшується пластичність металу майже до нуля, а профіль по краях руйнується.

Для усунення впливу залишкових напружень, що розтягують, та деформаційного зміцнення прокату в процесі його холодної деформаційної обробки використовують термічний або механічний методи. При використанні термічного методу необхідне обладнання для нагріву, а проведення операції термообробки потребує ще й додаткової витрати енергії. Механічний метод має кілька різновидів, з яких найбільш раціональний є правка прокату у холодному стані, який відчуває знакозмінну деформацію при протягуванні його через багатороликовий пристрій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та постановка проблеми. Відмінними рисами високоточних профілів, і зокрема профілів стрічкового типу (рис. 1), є висока рівномірність тимчасового опору по довжині мотка, висока точність форми та розмірів (допуск по товщині від $-0,03$ мм до $+0,04$ мм, а по ширині до $-0,01$ мм), різноширинність у межах мотка не більше $+0,07$ мм, гладкі (без рябизни) крайки з плавним закругленням і відношенням ширини перерізу до його товщини до 8 [1].

Схема виробництва високоточних профілів, яка склалася у світовій практиці, включає отримання фасонних заготовок способом гарячого деформування: гарячою прокаткою, гарячим пресуванням (основна формозміна металу) і подальшу холодну деформацію за один-три переходи волочінням або холодною про-



Рис. 1.

Зразок профілю стрічкового типу

каткою. Така технологічна схема при раціональних параметрах процесів забезпечує досить високу якість заготовки та готових виробів [1—3]. Однак, за даними економічних досліджень, проведених у Німеччині, прокатувати профілі на промислових прокатних станах доцільно лише за річної потреби одного профілю не менше 20 т [4].

У той же час, застосування високоточних профілів у сучасному машинобудуванні має велике значення з точки зору підвищення якості виробів, що виготовляються, і значного зниження собівартості їх виробництва. Так, наприклад, застосування поршневих кілець з високовуглецевих або легованих марок сталей, замість традиційних чавунних, дозволяє значно підвищити моторесурс машин та агрегатів, спростити та значною мірою автоматизувати технологічний процес виготовлення кілець, а також скоротити трудомісткість та екологічно шкідливе ливарне виробництво. При виробництві холоднодеформованих металовиробів за ДСТУ EN 10139:2022 з низьковуглецевих марок сталей, наприклад при виготовленні порошкового дроту, деталей підшипників та інших металовиробів, використовують заготовку у вигляді профілю стрічкового типу, яку отримують на стрічкопрокатних станах з листової заготовки. При цьому розмірний асортимент такого прокату має широкий діапазон як по товщині від 0,05 мм до 10,00 мм, так і по ширині від 4,00 мм до 600 мм, однак в окремих областях його використання розмірний асортимент значно вужче, особливо по ширині профілю. Наприклад, геометричні розміри профілю стрічкового типу, який є вихідною заготовкою для виробництва підшипників, мають бути такими: за товщини 3 мм необхідна ширина — не більше ніж 19 мм. В якості заготовки для порошкового дроту товщиною від 0,15 мм до 1,50 мм та шириною від 8,00 мм до 40,00 мм; при виготовленні деталей для автомобільної промисловості використовують профіль стрічкового типу товщиною 1,8 мм при ширині 9 мм, а при товщині 2 мм ширина такого профілю — менше ніж 20 мм. При цьому обсяги виробництва профілів стрічкового типу в загальному виробництві стрічкопрокатних виробничих комплексах незначні. З цієї причини, наприклад, при виробництві порошкового дроту, використовують профілі стрічкового типу, які отримують шляхом розрізання дисковими ножицями на необхідну ширину з холоднокатаної стрічки шириною від 250,00 мм до 300,00 мм. Така ж ситуація спостерігається і в інших галузях виробництва, де необхідні профілі стрічкового типу із відносно невеликою шириною. Тому з другої половини минулого століття ведеться пошук використання для виробництва профілів стрічкового типу невеликою шириною інших способів деформування.

В Україні виробництво високоточних профілів є вкрай обмеженим, а виробництво профілів стрічкового типу взагалі відсутнє. Обсяги виробництва такої продукції за високої потреби у широкому розмірному та марочному асортименті відносно невеликі (до 3 тис. т профілерозмірів загальним обсягом 45—50 тис. т на рік). Тому створення спеціалізованого

підприємства з виробництва високоточних профілів та сталевих плющеної стрічки в цих умовах (вартість обладнання до 20 тис. доларів США за тону) економічно недоцільно, а орієнтація на імпорт ставить у залежність від зарубіжних постачальників економічну і технологічну безпеку зазначених галузей економіки нашої країни [4].

Процес волочіння в роликових волоках застосовується для виробництва різного ряду фасонних профілів складної конфігурації, у тому числі тонкостінних, стрічкових і профілів періодичного перерізу. Цей процес в порівнянні з процесом волочіння у монолітних волоках дозволяє на 20—40 % зменшити енергетичні витрати, збільшити інтенсивність одиничних деформацій до 40—50 %, скоротити кількість підготовчих операцій (термообробка, травлення і нанесення мастильного шару), виключити застосування дорогих волочильних мастил [1, 5]. В порівнянні з холодною прокаткою профілів процес волочіння в роликових волоках має більшу технологічну гнучкість та не потребує суттєвих капітальних витрат при організації виробництва точних профілів, у тому числі стрічкового типу. Однак наявність тягового зусилля обмежує асортимент профілів, що виготовляються за компактністю їх поперечного перерізу.

Так, наприклад, в процесі холодного волочіння дроту в результаті складної дії пластичної деформації, тертя металу об стінки волоки і технологічних чинників у готовому виробі виникають внутрішні залишкові напруження. Встановлено, що ці напруження в периферійному шару дроту є розтягуючі, а в центральному — стискаючі [6, 7]. Щоб усунути шкідливий вплив розтягуючих залишкових напружень, необхідно або їх зменшити, або перевести в стискаючі напруження, які підвищують працездатність дроту. З цієї метою в практиці дрогового виробництва застосовують два методи: термічний і механічний. Перший полягає в низькотемпературній відпустці (від +250 °C до +350 °C) або індукційному нагріванні поверхні дроту; другий має кілька різновидів, з яких найбільш раціональний є правка металу у холодному стані.

Практично всі технологічні процеси виготовлення металопродукції методами пластичного деформування пов'язані з формуванням у готових виробах самоурівноваженої системи залишкових напружень [8—10]. При цьому актуальною задачею є встановлення впливу технологічних чинників на рівень залишкових напружень, особливо при виробництві металопродукції методами холодного деформування — наприклад, у разі знакозмінної деформації профілів стрічкового типу в згино-розтягуючому пристрої (ЗРП). За сприятливого розподілу залишкових напружень зростають міцність, працездатність та довговічність. Залишкові напруження впливають на розвиток уповільненого руйнування, втомну і крихку міцність, корозійну стійкість.

Існуючі загальні методи дослідження напружено-деформованого стану металу при обробці металів тиском можна поділити на дві основні групи — експериментальні та теоретичні [11, 12].

Експериментальні методи визначення напружено-деформованого стану металу у багатьох випадках дозволяють отримати достовірну картину течії металу та обчисленого за цією картиною напруженого стану. Однак експериментальні дослідження за цими методами мають такі недоліки: велика трудомісткість проведення експериментів та складність обробки одержаних результатів, мають велику (30 %) похибку вимірювання напружень, а також вимагають наявності дорогого обладнання та необхідності руйнації металовиробу (механічні методи) [13—15].

Для теоретичного дослідження напружено-деформованого стану металу при обробці металів тиском використовують різні методи: характеристик (ліній ковзання); варіаційні, дискретні, сіткові, проєкційні і проєкційно-сіточні та їх різновиди. З найбільш перспективних методів розв'язання деформаційних завдань є застосування чисельного моделювання, в основі якого покладено метод скінченних елементів (МСЕ). Нині МСЕ є один з найбільш розвинутих методів, який дозволяє моделювати явища та процеси з максимальним їх наближенням до реальності. Незважаючи на всю розвиненість математичного апарата та комп'ютерних технологій, сьогодні існує не так багато апробованих програмних продуктів, які дозволяють з високим ступенем достовірності моделювати процеси, що відбуваються при обробці металів тиском [16].

Моделюванню процесу волочіння в роликівих волоках присвячено не таку велику кількість робіт, як плющенню в приводних валках. Найбільший інтерес становлять дослідження напружено-деформованого стану металу в процесі волочіння в роликівих волоках, представлені в роботах [2, 5, 17, 18]. В Інституті чорної металургії НАН України протягом останнього часу проводяться дослідження процесу волочіння у роликівих волоках для виробництва профілів стрічкового типу [19—21]. В результаті цих досліджень було розроблено та перевірено кінцево-елементну математичну модель напружено-деформованого стану металу в процесі отримання профілів стрічкового типу різного розміру методом волочіння у роликівих волоках [4].

В роботах [22—25] досліджувався процес правки листового металопрокату на багатороликівих правильних машинах за допомогою розроблених математичних моделей цього процесу з визначенням енергосилових параметрів, контактної взаємодії між листом і роликівими, вирівнюючої здатності та урахуванням умов захоплення листів роликівими правильної машини, а також напружено-деформованого стану металу при навантаженні. В роботах [26, 27], які присвячені дослідженню процесу знакозмінного деформування катанки або дроту при протягуванні через окалиновідламувач з використанням розроблених математичних моделей, також визначаються лише енергосилові і температурні параметри процесу. Водночас у цих моделях відсутні дані про розподіл напружень за перерізом в металі при навантаженні, не враховується розподіл напружень за перерізом прокату після пружного розвантаження.

Таким чином, результати конкретних досліджень впливу параметрів процесу знакозмінного деформування профілів стрічкового типу на величину напружень і характер їх розподілу за перерізом прокату у розглянутих публікаціях відсутні. Механізм формування залишкового напруження при знакозмінному деформаційному впливі на профілі стрічкового типу є складним, що залежить від великої кількості технологічних та конструктивних параметрів ЗРП та показників вихідного профілю. У той час для обґрунтованого вибору параметрів процесу знакозмінного деформування профілів стрічкового типу необхідно знати вплив цих параметрів на величину і характер розподілу напружень за його перерізом, для того, щоб не допускати формування критичних значень напружень, що розтягують. Таке завдання нами було запропоновано вирішувати методом математичного моделювання.

Мета роботи. Відповідно метою роботи є встановлення залежностей зміни напруженого стану металу при протяжці профілю стрічкового типу через роликівий згино-розтягувальний пристрій.

Об'єкт та методика дослідження. Об'єктом дослідження є технологія виробництва профілів стрічкового типу. Метод дослідження — математичне моделювання процесу знакозмінного моделювання профілю стрічкового типу при протягуванні його через роликівий згино-розтягувальний пристрій.

Для аналітичних досліджень зміни напружено-деформованого стану профілів стрічкового типу від впливу параметрів знакозмінної деформації використовували математичну модель, яку розробили в Відділі обробки металів тиском (ВОМТ) ІЧМ НАН України для теоретичних досліджень напружено-деформованого металу при його деформації в процесі виготовлення прокату в роликівих волоках, яка заснована на методі кінцевих елементів [19—21]. Цю модель було нами доопрацьовано для умов процесу знакозмінного деформування профілів стрічкового типу в роликівому згино-розтягувальному пристрої [28—31]. Проведений нами аналіз наукових і науко-технічних джерел з дослідження напружено-деформованого стану металу показав відсутність даних, які стосуються випадку, коли прокат вийшов зі згино-розтягувального пристрою. Тому в цю модель додали можливість врахування впливу технологічних і конструктивних параметрів ЗРП на розподіл напружено-деформованого стану металу не тільки в процесі його деформації, а і після розвантаження профілю стрічкового типу.

Для моделювання знакозмінної деформації металу згином з розтягуванням використовували одно-площинний трироликівий ЗРП з вертикальним розташуванням роликів. Схему процесу знакозмінної деформації профілю стрічкового типу висотою $h = 5,2$ мм при протяжці в ЗРП наведено на рис. 2.

Параметри моделювання було прийнято з урахуванням можливостей технологічного обладнання прокатної лабораторії ІЧМ НАН України. Моделювання пружно-пластичного знакозмінного згину металу у системі SolidWorks Simulation включає наступні ета-

пи:

1) налаштування моделі — створення кінцево-елементної моделі профілю стрічкового типу, яка розміщується між верхніми та нижнім роликами;

2) вертикальне переміщення натискного нижнього ролика вгору у робоче положення з забезпеченням фіксації заданої величини переміщення;

3) прикладання сили тяжіння до системи за відсутності руху роликів;

4) надання швидкості обертання роликів для моделювання руху профілю стрічкового типу за рахунок сил тертя між прокатом та роликами;

5) оцінка пружного розвантаження матеріалу після виходу з ЗРП.

Перший і третій етапи — динамічні із завданням поступального та обертального рухів роликів ЗРП, а решта — статичні без завдання руху роликів.

Для опису контактної взаємодії між роликами та профілем стрічкового типу використовувалися вбудовані можливості системи SolidWorks Simulation,

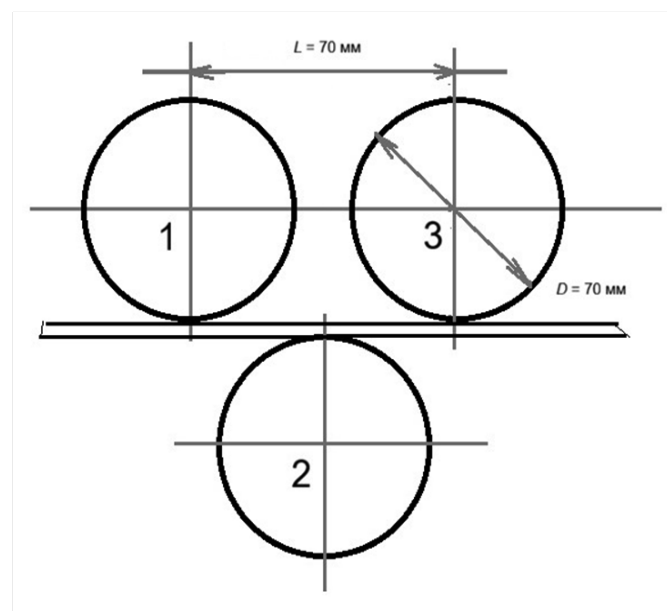


Рис. 2. Схема процесу знакозмінної деформації профілю стрічкового типу у трироликовому ЗРП

які дозволяють враховувати статичний та динамічний коефіцієнт тертя. За відсутності дотичних переміщень у контактній парі, що відповідає переміщенню натискного ролика вгору, використовується статичний коефіцієнт тертя, що дорівнює 0,25, а після початку руху прокату — динамічний, рівний 0,12.

Відстань між центрами осей опорних роликів 1 і 3 дорівнювала $L = 70$ мм, а діаметр роликів $D_p = 70$ мм, переміщення натискного ролика по вертикалі на відстань 4 мм. Матеріал роликів — сталь марки 40Х. При виконанні розрахунків в якості вихідних даних приймали наступні параметри: вихідна висота профілю стрічкового типу $h = 5,2$ мм, який отримали після попередньої холодної деформації в двовалковій роликівній волоці і з гладкими валками і відносним ступенем обтиснення 10 % з заготовки-дроту діаметром 5,9 мм; матеріал профілю стрічкового

типу — сталь марки Ст.08. Початкова умовна границя плинності після попередньої холодної деформації — 572 МПа; швидкість протягування — $v_{пр.} = 9,0$ м/хв (0,155 м/с). Також в розрахунку використовували наступні характеристики матеріалу штаби: щільність $\rho = 7850$ кг/м³; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$; модуль пружності першого роду $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа. Модель деформованого середовища — пружно-пластична. Між роликом 2 та нижньою поверхнею штаби визначено контактну взаємодію з коефіцієнтом тертя 0,25. На торцях профілю стрічкового типу були зафіксовані від переміщень за горизонталлю та вертикаллю точки в середині його висоти.

Результати досліджень та їх обговорення.

Результати моделювання розподілу напружень по висоті профілю стрічкового типу в процесі навантаження представлено на рис. 3.

З рис. 3 видно, що верхні шари металу відчувають напруження, що розтягують, а нижні — що стискають. При цьому максимальні значення напружень, які формуються в процесі знакозмінної деформації на верхній поверхні профілю стрічкового типу при його протягуванні через згино-розтягувальний пристрій, становлять +576 МПа, а на його нижній поверхні — -588 МПа. Ці значення вище величини границі

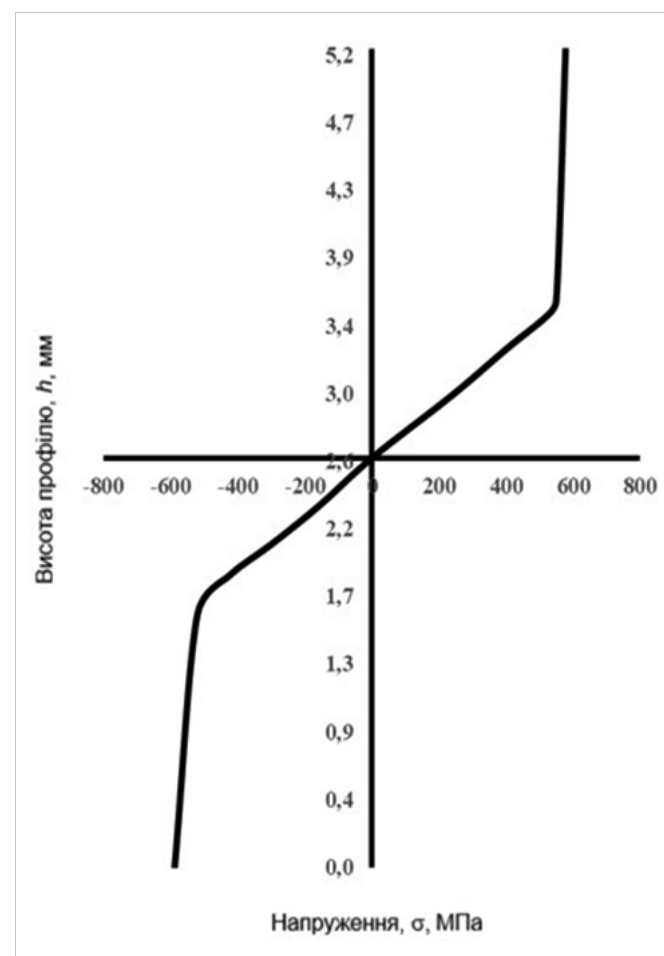


Рис. 3. Розподіл поперечних напружень по висоті профілю стрічкового типу під натискним роликом 2 в процесі його знакозмінної деформації

плинності сталевому прокату після попередньої холодної деформації його в двовалковій роликовій волоці зі ступенем відносної деформації 10 %, який складав $\sigma_{0,2} = 572$ МПа, тобто матеріал деформується в пружно-пластичній області.

З аналізу даних розрахунку, який наведено на рис. 3, встановлено, що при діаметрі опорних і натискних роликів $D_p = 70$ мм в середині сталевому прокату під натискним роликом 2 на глибині 1,60 мм від його верхньої та на висоті 1,60 мм від його нижньої поверхні відповідно спостерігається ділянка з пружною деформацією. Довжина ділянки з пружною деформацією становить 2,0 мм, а загальна довжина двох ділянок з пружно-пластичною деформацією дорівнює 3,2 мм.

На рис. 4. наведено розподіл напружень за поперечним перерізом профілю стрічкового типу після пружного розвантаження на виході зі згино-розтягуювального пристрою.

Після пружного розвантаження характер розподілу повздовжніх залишкових напружень за поперечним перерізом стає складнішим — верхні волокна матеріалу профілю стрічкового типу та волокна матеріалу прокату, що розташовуються на відстані 1,2 мм вглиб від верху прокату, стискаються. Максимальне значення залишкових стискаючих напружень на верхніх шарах профілю стрічкового типу становить -350 МПа. В середині профілю, на відстані від 1,2 мм

до 2,6 мм від верху прокату, відбувається зміна знака залишкових напружень і волокна матеріалу прокату розтягуються. У цьому випадку максимальне значення залишкових напружень, що розтягують волокна матеріалу профілю стрічкового типу, спостерігається на глибині 1,8 мм від верху прокату і становить +289 МПа.

Далі по висоті прокату на відстані від 2,6 мм до 4,0 мм від верху профілю стрічкового типу знову відбувається зміна знака залишкових напружень та волокна матеріалу прокату стискаються. При цьому максимальне значення залишкових стискаючих напружень формується на глибині 3,4 мм від верху прокату і дорівнює -334 МПа.

По висоті профілю стрічкового типу у волокнах металу, які розташовані від нижньої поверхні прокату до висоти 1,2 мм від нижньої поверхні металу, знов спостерігається зміна знака напруження, і ці волокна зазнають розтягнення. Максимальне значення залишкових напружень, що розтягують у нижніх шарах штаби після її виходу з ЗРП, становить +365 МПа.

При знятті зовнішнього впливу відбувається пружне розвантаження матеріалу профілю стрічкового типу, яке супроводжується релаксацією напружень у приповерхневих областях прокату, з формуванням області «стиснених» пружних напружень у центральній частині перерізу профілю.

Для порівняння характеру зміни напружень за поперечним перерізом профілю стрічкового типу, на рис. 5 наведено графіки розподілу напружень по висоті прокату під навантаженням, після його пружного розвантаження та зміни напружень в процесі пружного розвантаження.

З рис. 5 видно, що центральна частина перерізу профілю стрічкового типу зазнавала лише пружних деформацій у процесі навантаження. Через наявність пружних деформацій у середині прокату у цій зоні відбувається накопичення потенційної енергії деформації при знакозмінній деформації профілю стрічкового типу. Оскільки незворотні пластичні деформації локалізовані у приповерхневих шарах прокату висотою, що дорівнює 1,2 мм зверху і знизу, то при розвантаженні ці шари стають перешкодою щодо вивільнення оборотної потенційної енергії пружної деформації. Саме наявність обмеженої потенційної енергії призводить до виникнення залишкових напружень.

При видаленні зовнішніх сил накопичена потенційна енергія витрачається на відновлення початкового недеформованого стану профілю стрічкового типу. Завдяки цьому в поверхневих розтягнутих волокнах у верхній частині профілю стрічкового типу виникають внутрішні зусилля, що призводять до їх стиснення, а в нижніх стиснутих поверхневих волокнах прокату, навпаки, — до розтягування. Таким чином, після зняття навантаження виникають стискаючі залишкові напруження зверху прокату і напруження, що розтягують, знизу профілю; ці напруження врівноважуються напруженнями, що виникають в іншій частині перерізу металу.

За результатами моделювання було побудова-

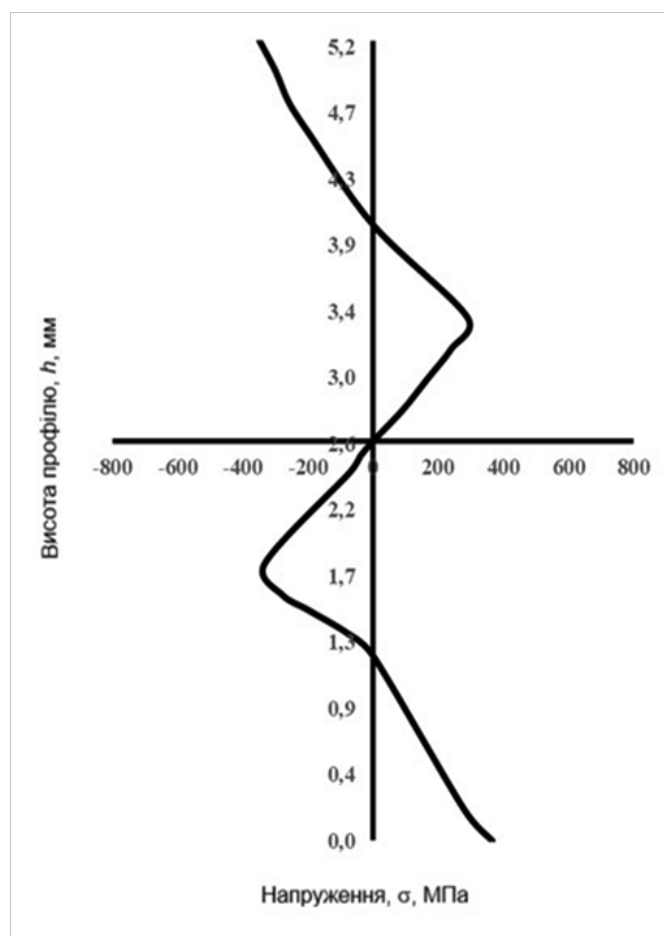


Рис. 4. Розподіл повздовжніх напружень по висоті профілю стрічкового типу після пружного розвантаження

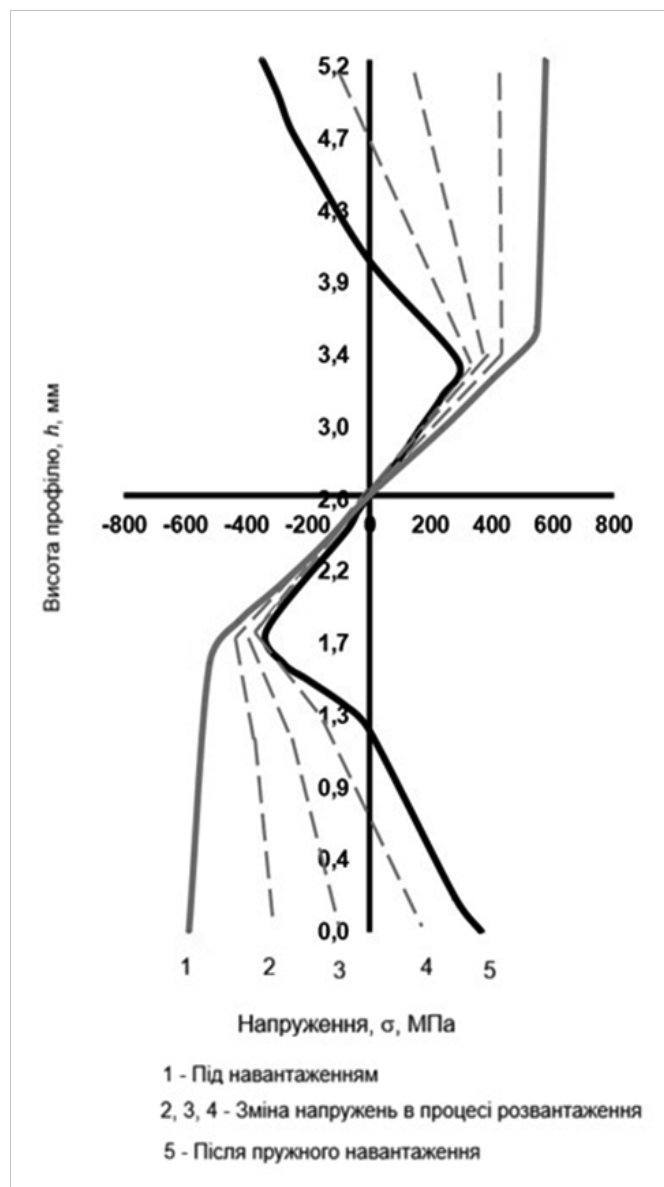


Рис. 5. Графіки розподілу напружень по висоті профілю стрічкового типу під навантаженням, після пружного розвантаження та зміни напружень в процесі пружного розвантаження

но графік зміни потенційної енергії U , яку отримали підсумовуванням всіх значень по товщині профілю, залежно від часу процесу (рис. 6).

При русі вгору нижнього ролика за час, що дорівнює 0,3 с, відбулося накопичення потенційної енергії до 2,54 мДж, далі при розвантаженні протягом 0,7 с у матеріалі залишилася накопичена потенційна енергія, що дорівнює 1,26 мДж.

У контакті з роликом 2 спостерігається зростання потенційної енергії, а при виході профілю стрічкового типу з контакту із роликом — її зменшення. Зі зростанням міцності матеріалу профілю стрічкового типу при одних і тих же параметрах знакозмінної деформації потенційна енергія зростає, значення її залишаються більшими і під час проходження прокату між роликами. Але після виходу профілю стрічкового типу

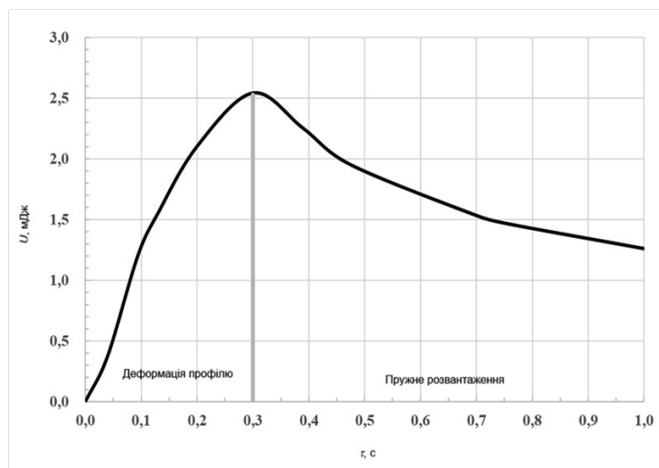


Рис. 6. Зміна потенційної енергії залежно від часу процесу знакозмінної деформації профілю стрічкового типу

з ЗРП значення потенційної енергії зменшується від 2,54 мДж до 1,26 мДж або в два рази. Таким чином, механізм виникнення залишкових напружень в процесі знакозмінного деформування профілю стрічкового типу при його протягуванні через згино-розтягувальний пристрій обумовлено неоднорідністю розподілу деформацій по висоті прокату.

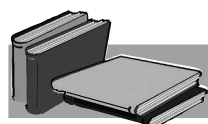
Висновки

За допомогою математичного моделювання процесу знакозмінної деформації профілю стрічкового типу висотою 5,2 мм зі сталі марки Ст.08 вперше встановлено, що:

— механізм виникнення залишкових напружень обумовлений величиною пластичної деформації та неоднорідністю розподілу деформацій по висоті профілю стрічкового типу при обробці в згино-розтягуальному пристрої;

— після знакозмінного деформування в згино-розтягуальному пристрої на верхній поверхні профілю стрічкового типу формуються поздовжні залишкові напруження, що стискають, а на нижній — що розтягують, в середині по його висоті вони дорівнюють нулю, в інших частинах перерізу значення напруження протилежні за знаком.

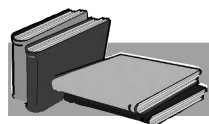
Отримані результати дають змогу визначати основні підходи до проектування технологічних параметрів процесу знакозмінної деформації профілів стрічкового типу в згино-розтягуальному пристрої, що забезпечить високу якість їхнього виробництва.



ЛІТЕРАТУРА

1. Wright R.N. Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, 2016. 340 p.
2. Kazeminezhad M., Taheri A.K. A theoretical and experimental investigation on wire flat rolling process using deformation pattern. *Materials & Design*. 2005. Vol. 26. Iss. 2. P. 99—103. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.06.010>
3. Langer J., Kleiner M. Handbook of Metal Forming. Cham, 2022. 573 p.
4. Razdobreev V.G., Kluychnikov K.Yu., Leschenko A.I., Palamar D.G., Vorobei S.O. Production Efficiency of Ribbon-Type Sections by the Drawing Method in Doubled-Roll Roller Dies. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. Iss. 6. P. 40—50. <https://doi.org/10.15407/scine19.06.040>
5. Lambiasi F., Di Ilio A. Experimental and Finite Element Investigation of Roll Drawing Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012. Vol. 21. Iss. 2. P. 161—166. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9932-1>
6. Roberts W.L. Cold Rolling of Steel. CRC Press, 2017. 808 p.
7. Ripoll M.R., Weygand S.M., Riedel H. Reduction of tensile residual stress during the drawing process of tungsten wires. *Materials science and engineering: A*. 2010. Vol. 527. Iss. 13—14. P. 3064—3072. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.079>
8. Lin H-S., Hsu Yu-Ch., Keh Ch-Ch. Inhomogeneous deformation and residual stress in skin-pass axisymmetric drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 201. Iss. 1—3. P. 128—132. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.126>
9. Schajer G.S. Practical Residual Stress Measurement Methods. Wiley, 2013. 328 p.
10. Lu J. Handbook of Measurement of Residual Stresses. Society for Experimental Mechanics. Prentice Hall, 1996. 238 p.
11. Sciammarella C.A., Sciammarella F.M. Experimental Mechanics of Solids: Theory, Techniques, and Applications. Wiley, 2012. 736 p.
12. Kobayashi A.S. Handbook on Experimental Mechanics. Mechanics of Solids Series, Society for Experimental Mechanics, 2nd Edition. VCH Publishers, 1993. 1074 p.
13. Noyan I.C., Cohen J.B. Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation. Verlag, 1987. 276 p.
14. Totten G.E., Howes M., Inoue T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, 2002. 499 p.
15. Sharpe W.N. Handbook of Experimental Solid Mechanics. Springer, 2008. 1128 p.
16. Schwenzfeier W., Philip M., Harrer O. Simulation in der Metallurgie. *Metallurgija*. 2002. Vol. 41. Iss. 3. P. 143—147. URL: <https://hrcak.srce.hr/file/189878> (дата звернення: 29.06.2026).
17. Miha A.-M., Sas-Boca I.-M., Marian I., Miha I.S., Ianc D.S., Nistor L., Ilutiu-Varvara D.-A. Finite Element Analysis of Drawing Wire in Cassette Roller Die (Part 2). *Procedia Technology*. 2016. Vol. 22. P. 34—39. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.006>
18. Gao H., Liu J., Wang Z. Numerical investigation on cross-sectional shape evolution in wire flat rolling. *Materials Research Express*. 2020. 7(3), Art. 036524.
19. Ключніков К.Ю., Раздобреєв В.Г., Лещенко О.І., Паламар Д.Г. До питання про визначення граничних умов процесу прокатки-волочіння у здвоєних роликів волоках. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії: 36. наук. праць ІЧМ*. Дніпро: Візіон. 2021. Вип. 35. С. 134—148. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2021-35-134-148>
20. Раздобреєв В.Г., Ключніков К.Ю., Лещенко О.І., Паламар Д.Г. Математичне моделювання процесу отримання профілів стрічкового типу з круглої заготовки. «Проблеми математичного моделювання»: матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції. Кам'янське, 2023. С. 117—120.
21. Раздобреєв В.Г., Ключніков К.Ю., Лещенко О.І., Паламар Д.Г. Дослідження впливу основних технологічних параметрів процесу волочіння в здвоєних роликів волоках на динамічні характеристики процесу. «Літео. Металургія. 2023»: матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції. Харків-Київ, 2023. С. 376—379. <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023>
22. Gribkov E.P., Kovalenko A.K., Hurkovskaya S.S. Research and simulation of the sheet leveling machine manufacturing capabilities. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 120 (1—2). P. 743—759. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08806-z>
23. Ulibarri Hernández U., Mendiguren J., Sáenz de Argandoña E., Galdos L., Silvestre E., Gil I. Friction characterisation in levelling processes. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2016. Vol. 2. No. 4. P. 503—513. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1247230>
24. Liu Zf., Luo Yx., Yan Xc. et al. Boundary determination of leveling capacity for plate roller leveler based on curvature integration method. *Journal of Central South University*. 2015. Vol. 22. P. 4608—4616. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3011-y>
25. Liu Z., Luo Y., Wang Y., Warren Liao T., Deng M. An analytical study of optimal roller intermeshes for the plate leveling process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021. Vol. 235. No. 1—2. P. 278—289. <https://doi.org/10.1177/20954405420947959>
26. Ломова О.Б. Розробка основ ресурсозберігаючого процесу сумісного безфільєрного та фільєрного волочіння сталеві низьковуглецевої катанки: дис. ... канд. тех. наук: 05.03.05. Дніпропетровськ, 2010. 143 с.

27. Ломова О.Б. Зіставлення показників якості технологічних процесів безфільєрного і фільєрного деформування сталевих дроту. *Теорія і практика металургії*. 2014. № 1—2. С. 71—74.
28. Раздобреєв В.Г., Приходько І.Ю., Ключніков К.Ю., Паламар Д.Г., Лещенко О.І. Вибір методики визначення енергосилових параметрів процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії: зб. наук. праць Інституту чорної металургії*. Дніпро: Візіон, 2023. Вип. 37. С. 358—373. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-358-373>
29. Razdobreev V.G., Kluychnikov K.Yu., Leschchenko A.I., Palamar D.G., Ivanov A.P. Mathematical modeling of variable deformation of the strip. *«Проблеми математичного моделювання»: матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції*. Кам'янське, 2025. С. 117—120.
30. Раздобреєв В., Ключніков К., Паламар Д., Лещенко О., Іванов О. Моделювання напруженого стану металу при знакозмінному деформуванні штаби в згино-розтягувальному пристрої. *«Сучасні проблеми механіки у конструкціях спеціального призначення»: збірник матеріалів I міжнародної науково-технічної конференції*. Дніпро, 2025. С. 371—374.
31. Раздобреєв В.Г., Ключніков К.Ю., Лещенко О.І., Паламар Д.Г. Аналітичні дослідження напруженого стану металу при деформації штаби у згино-розтягувальному пристрої. *«Литве. Металургія. 2025»: Матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків-Київ, 2025. С. 448—452. <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2025>



REFERENCES

1. Wright, R. N. (2016). *Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
2. Kazeminezhad, M., & Taheri, K. A. (2005). A theoretical and experimental investigation on wire flat rolling process using deformation pattern. *Materials & Design*, 26(2), 99-103. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.06.010>
3. Langer, J., & Kleiner, M. (2022). *Handbook of Metal Forming*. Cham.
4. Razdobreev, V. G., Kluichnikov, K. Yu., Leschenko, A. I., Palamar, D. G., & Vorobei, S. O. (2023). Production Efficiency of Ribbon-Type Sections by the Drawing Method in Doubled-Roll Roller Dies. *Science and Innovation*, 19(6), 40-50. <https://doi.org/10.15407/scine19.06.040>
5. Lambiase, F., & Di Ilio, A. (2012). Experimental and Finite Element Investigation of Roll Drawing Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(2), 161-166. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9932-1>
6. Roberts, W. L. (2017). *Cold Rolling of Steel*. CRC Press.
7. Ripoll, M. R., Weygand, S. M., & Riedel, H. (2010). Reduction of tensile residual stress during the drawing process of tungsten wires. *Materials science and engineering: A*, 527(13-14), 3064-3072. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.079>
8. Lin, H.-S., Hsu, Yu-Ch., & Keh, Ch-Ch. (2008). Inhomogeneous deformation and residual stress in skin-pass axisymmetric drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1-3), 128-132. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.126>
9. Schajer, G. S. (2013). *Practical Residual Stress Measurement Methods*. Wiley.
10. Lu, J. (1996). *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Society for Experimental Mechanics. Prentice Hall.
11. Sciammarella, C. A., & Sciammarella, F. M. (2012). *Experimental Mechanics of Solids: Theory, Techniques, and Applications*. Wiley.
12. Kobayashi, A. S. (1993). *Handbook on Experimental Mechanics*. Mechanics of Solids Series, Society for Experimental Mechanics, 2nd Edition. VCH Publishers.
13. Noyan, I. C., & Cohen, J. B. (1987). *Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation*. Verlag.
14. Totten, G. E., Howes, M., & Inoue, T. (2002). *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International.
15. Sharpe, W. N. (2008). *Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Springer.
16. Schwenzfeier, W., Philip, M., & Harrer, O. (2002). Simulation in der Metallurgie [Simulation in Metallurgy]. *Metallurgija*, 41(3), 143-147. <https://hrcak.srce.hr/file/189878> [in German].
17. Mihiu, A.-M., Sas-Boca, I.-M., Marian, I., Mihiu, I. S., Ianc, D. S., Nistor, L., & Ilutiu-Varvara, D.-A. (2016). Finite Element Analysis of Drawing Wire in Cassette Roller Die (Part 2). *Procedia Technology*, 22, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.006>
18. Gao, H., Liu, J., & Wang, Z. (2020). Numerical investigation on cross-sectional shape evolution in wire flat rolling. *Materials Research Express*, 7(3), Art. 036524.
19. Klyuchnikov, K. Yu., Razdobreev, V. G., Leshchenko, O. I., & Palamar, D. G. (2021). Do pytannya pro vyznachennya hranychnykh umov protsesu prokatky-volochinnya u zdvoyenykh rolykovykh volokakh [On the determination of boundary conditions for the roll-drawing process in twin-roll dies]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (35), 134-148. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2021-35-134-148> [in Ukrainian].
20. Razdobreev, V. G., Kluichnikov, K. Yu., Leschenko, A. I., & Palamar, D. G. (2023). Mathematical modeling of the process of producing strip-type profiles from a round billet. "Problems of Mathematical Modeling": Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Methodological Conference. (Kamianske, May 24-26, 2023). Kamianske, pp. 117-120 [in Ukrainian].
21. Razdobreev, V. G., Kluichnikov, K. Yu., Leschenko, A. I., & Palamar, D. G. (2023). Study of the influence of the main technological parameters of the drawing process in double roller draws on the dynamic characteristics of the process. Foundry. Metallurgy. 2023: Proceeding of the XXII International Scientific and Practical Conference. (Kharkiv-Kyiv, October 10-12, 2023). Kharkiv-Kyiv, pp. 376-379. <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023> [in Ukrainian].
22. Gribkov, E. P., Kovalenko, A. K., & Hurkovskaya, S. S. (2022). Research and simulation of the sheet leveling machine manufacturing capabilities. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(1-2), 743-759. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08806-z>
23. Ulibarri Hernández, U., Mendiguren, J., Sáenz de Argandoña, E., Galdos, L., Silvestre, E., & Gil, I. (2016). Friction characterisation in levelling processes. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2(4), 503-513. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1247230>
24. Liu, Zf., Luo, Yx., Yan, Xc. et al. (2015). Boundary determination of leveling capacity for plate roller leveler based on curvature integration method. *Journal of Central South University*, 22, 4608-4616. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3011-y>
25. Liu, Z., Luo, Y., Wang, Y., Warren Liao, T., & Deng, M. (2021). An analytical study of optimal roller intermeshes for the plate leveling process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(1-2), 278-289. <https://doi.org/10.1177/20954405420947959>

26. Lomova, O. B. (2010). Rozrobka osnov resursozberihayuchoho protsesu sumisnoho bezfil'vernoho ta fil'vernoho volochinnya stalevoyi nyz'kovuhletsevoyi katanky: dys. ... kand. tekhn. nauk [Development of the fundamentals of a resource-saving process for the combined die-less and die drawing of low-carbon steel wire rod]. Candidate of Technical Sciences dissertation, National Metallurgical Academy of Ukraine. NMAU [in Ukrainian].
27. Lomova, O. B. (2014). Zistavlennya pokaznykiv yakosti tekhnolohichnykh protsesiv bezfil'vernoho i fil'vernoho deformuvannya stalevoho drotu [Comparison of quality indicators for die-less and die-based steel wire deformation processes]. *Theory and Practice of Metallurgy*, (1-2), 71-74 [in Ukrainian].
28. Razdobreev, V. G., Prykhodko, I. Yu., Klyuchnikov, K. Yu., Palamar, D. G., & Leshchenko, O. I. (2023). Choice of the method of determining the energy-force parameters of the process of drawn of the stack through a bending-tensioning device. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. Dnipropetrovsk: ISI of the National Academy of Sciences of Ukraine, (37), 358-373. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-358-373> [in Ukrainian].
29. Razdobreev, V. G., Klyuchnikov, K. Yu., Leshchenko, A. I., Palamar, D. G., & Ivanov, A. P. (2025). Mathematical modeling of variable deformation of the strip. *"Problems of Mathematical Modeling"*: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Methodological Conference (Kamianske, May 27-28, 2025). Kamianske, pp. 117-120.
30. Razdobreev, V. G., Klyuchnikov, K. Yu., Palamar, D. G., Leshchenko, A. I., & Ivanov, A. P. (2025). Modelyuvannya napruzhenoho stanu metalu pry znakovminnomu deformuvanni shtaby v zhyno-roztyahuval'nomu prystroyi [Modeling the stress state of a metal during alternating deformation of a staff in a bending-tensile device]. *"Modern problems of mechanics in special-purpose structures"*: collection of materials of the 1st international scientific and technical conference. (Dnipro, March 26-28, 2025). Dnipro, pp. 371-374 [in Ukrainian].
31. Razdobreev, V. G., Klyuchnikov, K. Yu., Leshchenko, O. I., & Palamar, D. G. (2025). Analitychni doslidzhennya napruzhenoho stanu metalu pry deformatsiyi shtaby u zhyno-roztyahuval'nomu prystroyi [Analytical studies of the metal stress state during deformation of the rod in a bending and tensile device]. *"Casting. Metallurgy. 2025"*: Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference. (Kharkiv-Kyiv, May 27-29, 2025). Kharkiv-Kyiv, pp. 448-452. <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2025> [in Ukrainian].

Надійшла/Received 30.06.2026

Прийнята/Accepted 14.07.2026

Опублікована/Published 28.09.2026

Summary

V.G. Razdobreev, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher of the Department of Metal Forming Processes and Machines, e-mail: v_razdobreev@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7402-7992>
K.Yu. Kluychnikov, Junior Researcher of the Department of Metal Forming Processes and Machines, e-mail: kirill.shaman.k@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2465-3244>
O.I. Leshchenko, Junior Researcher of the Department of Metal Forming Processes and Machines, e-mail: leschenko.a.73@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1877-8358>
D.G. Palamar, Junior Researcher of the Department of Metal Forming Processes and Machines, e-mail: damjan@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9503-3248>
O.P. Ivanov, PhD (Engin.), Associate Professor, Leading Engineer of the Department of Metal Forming Processes and Machines, e-mail: iva.dnp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1259-6377>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Formation of Stresses Along the Height of a Strip-Type Profile When It Is Pulled Through a Roller Device

The roller-die drawing process is an efficient method for producing high-precision, small-cross-section strip-type profiles, combining the advantages of rolling and drawing. The primary tool is a roller die featuring non-driven working rolls. Compared to conventional cold rolling and flattening, this process has higher technological flexibility and does not require large capital investments. Advantages over traditional drawing in monolithic drawing dies are lower energy consumption, greater allowable deformation per pass, and better uniformity of product properties. The main drawback is the presence of tensile force, which, combined with a reduction in the metal's ductility, can cause the rolled stock to fail, limiting the range of profiles and the total amount of reduction per pass. The ductility of metal can be increased by thermal or mechanical methods. The thermal method is energy-intensive, while the mechanical method involves alternating deformation of profiles, which can be implemented using straightening equipment or scale breakers. To solve the problem, it is proposed to combine drawing in a roller drawing machine with alternating deformation in a roller bending-tensile device. To select the parameters of alternating deformation, mathematical modeling of the process was used, taking into account the influence on the stress distribution in the profile. Analytical studies using the example of steel grade St.08 showed that residual stresses are formed due to the inhomogeneity of the distribution of plastic deformations along the height of the profile. After unloading, compressive residual stresses are formed on the upper surface, and tensile stresses – on the lower surface; in the middle of the profile, the stresses are close to zero, and in other parts they have opposite signs. The results obtained allow us to determine the main approaches to designing the technological parameters of the process of alternating deformation of strip-type profiles in a bending-tensile device, which will ensure their high-quality production. The studies conducted demonstrate the feasibility of solving the problem of supplying machine-building and instrument-making enterprises with precision profiles across a wide range of sizes.

Keywords

Strip-type profiles, drawing, roller die, bending-tensile device, alternating deformation, stress-strain state.