

УДК 621.771.22.04

В. Г. Раздобреєв¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992**І. Ю. Приходько**¹, д.т.н., с.н.с., зав. відділом, ORCID 0000-0001-5651-8106**К. Ю. Ключніков**¹, м.н.с., ORCID 0000-0003-2465-3244**Д. Г. Паламар**¹, м.н.с., ORCID 0000-0002-9503-3248**О. І. Лещенко**¹, м.н.с., ORCID 0000-0003-1877-8358¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ВИБІР МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПРОТЯГУВАННЯ ШТАБИ ЧЕРЕЗ ЗГИНО-РОЗТЯГУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ

Анотація. В практиці виробництва металовиробів особливу роль відіграють фасонні профілі складної конфігурації, у тому числі тонкостінні, стрічкові і профілі періодичного перерізу. Якісні особливо високоточні фасонні профілі з різним співвідношенням ширини до висоти стрічки, які виробляються малотоннажними партіями за кордоном та широко використовуються на підприємствах машинобудування, приладобудування, авіабудування та інших галузях господарства. В Україні виробництво високоточних фасонних профілів є вкрай обмеженим, а виробництво профілів стрічкового типу взагалі відсутнє. Фасонні профілі стрічкового типу зазвичай виробляють холодною деформацією на волочильних, плющильних або листопрокатних станах. Використання волочіння в роликівих волоках в порівнянні з холодною прокаткою та плющенням має більш високу технологічну гнучкість, не потребує великих капітальних витрат для організації виробництва. Порівняно із традиційним волочінням з використанням монолітних волок, процес волочіння в роликівих волоках має наступні переваги: нижче витрата енергії; вище допустима деформація за прохід; вища однорідність властивостей продукції, не використовують дорогі волочильні мастила, не проводять додаткові спеціальні операції підготовки металу до волочіння (фосфатування, оксалатування, міднення, покриття бурою тощо). Основний недолік способу волочіння в роликівих волоках – наявність тягового зусилля. Напруження, що розтягують профіль у сукупності зі зниженням пластичності металу в процесі волочіння, можуть привести до руйнування прокату. Щоб усунути шкідливий вплив залишкових напружень, що розтягують необхідно або їх знівелювати, або перевести в стискаючі напруги, які підвищують працездатність сталевієї заготовки. З цією метою в практиці виробництва дроту застосовують два способи: термічний і механічний. Термічний спосіб, який застосовується в промисловості, потребує значних витрат енергії. Механічний спосіб має кілька різновидів, з яких найбільш раціональний є процес знакозмінної деформації з розтягуванням дроту в згино-розтягувальному пристрої. Процес холодного деформування із застосуванням згино-розтягувального пристрою відбувається з протинатягом, величина якого дорівнює зусиллю протягування заготовки через цей пристрій. Протинатяг визначає зусилля холодної деформації і

потужність приводного двигуна тягучого пристрою, величину максимально можливої деформації за перший прохід, стійкість процесу холодної деформації та інші параметри. Працюючи з великим протинатягом можливі часті обриви прокату. Тому дуже важливо правильно розрахувати зусилля холодної деформації із застосуванням згино-розтягувальних роликів пристроїв. Метою роботи: на підставі виконаного аналізу, вибрати методику для визначення енергосилових параметрів процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій. В результаті аналізу визначена методика розрахунку силових параметрів процесу та формозміни катанки в згино-розтягувальному роликівому пристрої з комплексним урахуванням взаємної залежності ступеня деформації, сили протягування металу, а зміни механічних властивостей у процесі деформації штаби у роликівому згино-розтягувальному пристрої прийняли методику, яку розробили раніше в ІЧМ НАНУ. Обрані методики слугують у подальшому для розробки математичної моделі розрахунку енергосилових параметрів та параметрів формозміни процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій, що дозволить проводити обґрунтований вибір параметрів знакозмінного вигину штаби.

Ключові слова: методика визначення енергосилових параметрів, знакозмінне деформування з розтягненням, профілі стрічкового типу, механічні властивості, згино-розтягувальний роликівий пристрій.

Посилання для цитування: Вибір методики визначення енергосилових параметрів процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій / В. Г. Раздобреєв, І. Ю. Приходько, К. Ю. Ключніков, Д. Г. Паламар, О. І. Лещенко // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 358-373. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-358-373>

Вступ. Сучасний розвиток техніки неможливо уявити без використання металовиробів, у тому числі, виробів з дроту. До них пред'являють високі вимоги по різноманіттю й якості, а до процесів виробництва, наприклад, фасонних профілів складної конфігурації, у тому числі тонкостінних, стрічкових і профілів періодичного перерізу – гнучості технології, високої ефективності і економічності, безпеки праці і автоматизації. Якісні особливо високоточні фасонні профілі з різним співвідношенням ширини (b) до висоти (h), які виробляються малотоннажними партіями за кордоном, широко використовуються на підприємствах машинобудування, приладобудування, авіабудування та інших галузях господарства. В Україні виробництво високоточних фасонних профілів є вкрай обмеженим, а виробництво профілів стрічкового типу взагалі відсутнє. Обсяги виробництва такої продукції при високій потребі у широкому розмірному та марочному сортаменті відносно невеликі (до 3 тис. профілерозмірів загальним обсягом 45- 50 тис. т. на рік), тому

створення спеціалізованого підприємства з виробництва високоточних профілів та сталеві плушеної стрічки в цих умовах (вартість обладнання до 20 тис. доларів США за тонну) економічно недоцільно, а орієнтація на їх імпорт ставить у залежність від закордонних постачальників економічну та технологічну безпеку зазначених галузей економіки нашої країни.

Одним з них є процес волочіння металу у роликівих волоках, який поєднав в собі особливості двох методів обробки металів тиском – прокатки і волочіння. Основним робочим інструментом при застосуванні процесу волочіння в роликівих волоках є роликівий волока з непривідними робочими роликами [1-4].

Використання волочіння в роликівих волоках ефективно в умовах виробництва прутків і дроту фасонного перерізу, у чорнових проходах при волочінні катанки, литої і інших видів заготовок, при виробництві арматурного прокату та дроту, який виробляється з матеріалів, що важко деформуються.

Порівняно з холодною прокаткою та плушенням процес волочіння в роликівих волоках має більш високу технологічну гнучкість, не потребує великих капітальних витрат для організації виробництва. Порівняно із традиційним волочінням з використанням монолітних волок, процес волочіння в роликівих волоках має наступні переваги: нижче витрата енергії; вище допустима деформація за прохід; вища однорідність властивостей продукції, не використовують дорогі волочильні мастила, не проводять додаткові спеціальні операції підготовки металу до волочіння (фосфатування, оксалатування, міднення, покриття бурою тощо).

Основний недолік способу волочіння в роликівих волоках – наявність тягового зусилля. Напруження, що розтягують профіль у сукупності зі зниженням пластичності металу в процесі волочіння, можуть привести до руйнування прокату. Справа в тому, що деформація вихідної заготовки круглого перерізу в роликівих волоках з гладкою бочкою призводить до нерівномірного розподілу напружень по перерізу профілю: в середній частині - стиснення, а у крайок - розтягування, а наявність тягового зусилля збільшує площу зони дії напруг, що розтягують і їх величину в обсязі осередку деформації, і в кінцевому рахунку, при певних умовах викликає руйнування кромки готового профілю. Це обмежує сортамент профілів, сумарне обтиснення за один перехід.

Щоб усунути шкідливий вплив залишкових напружень, що розтягують необхідно або їх знівелювати, або перевести в стискаючі напруги, які підвищують працездатність сталеві заготовки. З цією метою в практиці виробництва дроту застосовують два способи:

термічний і механічний. Перший полягає в низькотемпературній відпустці (при $+250...+350$ °С) або індукційного нагрівання поверхні дроту. Термічний спосіб, якій застосовується в промисловості, потребує значних витрат енергії. Другий має кілька різновидів, з яких найбільш раціональний є процес знакозмінної деформації з розтягуванням дроту. Проведені попередні дослідження, в тому числі й в ІЧМ НАНУ, показали, що підвищити пластичність металу можливо способом деформування профілів за схемою «розтягування – знакозмінний згин», застосував для цього, наприклад, обладнання для рихтування профілів або окалинозламувача.

Знакозмінна деформація способом «розтягування зі згином» при обробці металів тиском проводиться для досягнення різних цілей, таких, як зняття залишкових напружень (рихтування), видалення окалини, виробництво дроту або арматурного прокату розтягуванням зі згином, а також може бути використана як обробка зміцнення - знеміцнення готового прокату [5-18]. Для реалізації знакозмінної деформації найбільш простим та ефективним є роликівий згино-розтягувальний пристрій (ЗРП). Основними технологічними параметрами при виробництві металовиробів за таким способом є:

- 1) вихідний діаметр заготовки;
- 2) марка сталі;
- 3) вихідний рівень механічних властивостей готового прокату;
- 4) величина кута охоплення ролика, який здійснює згин штаби;
- 5) значення відношення діаметрів ролика та штаби;
- 6) величини зусилля протинатягу перед першим роликом.

Застосування знакозмінного вигину при виробництві профілів стрічкового типу волочінням в роликівих волоках дозволить отримувати більш рівномірний напружений стан металу, а також зменшувати величину напружень, що розтягують на краях готового профілю. Це, в свою чергу, дозволить підвищити якість готових профілів стрічкового типу. Разом з тим, для обґрунтованого вибору параметрів знакозмінного вигину необхідно знати їх вплив на величину і характер розподілу напружень по перерізу стрічки. Таким чином, дослідження впливу знакозмінного вигину на деформаційні і технологічні параметри процесу волочіння профілів стрічкового типу в роликівих волоках є актуальним і дозволить комплексно вирішувати проблему забезпечення машинобудівних і приладобудівних підприємств точними профілями широкого розмірного асортименту.

Процес холодного деформування із застосуванням згино-розтягувального пристрою ведеться з протинатягом, величина якого дорівнює зусиллю протягування заготовки через цей пристрій. Протинатяг визначає зусилля холодної деформації і потужність

приводного двигуна тягучого пристрою, величину максимально можливої деформації за перший прохід, стійкість процесу холодної деформації та інші параметри. Працюючи з великим протинатягом можливі часті обриви прокату. Тому дуже важливо правильно розрахувати зусилля холодної деформації із застосуванням згино-розтягувальних роликів пристроїв. У зв'язку з цим провели аналіз методів розрахунку енергосилових та деформаційних параметрів процесу знакозмінної деформаційної обробки готового прокату й металовиробів.

Мета роботи. На підставі виконаного аналізу, вибрати методіку для визначення енергосилових параметрів процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій.

Результати дослідження. Поточне використання згино-розтягувального пристрою (ЗРП) у процесі волочіння обумовлює появу заднього натягу на першому роликів ЗРП, який чисельно дорівнює силі протягування у роликівій волоці (рис. 1). Одночасно з іншими параметрами процесу (властивостями міцності заготовки, швидкісними та геометричними параметрами деформації), величина сили заднього натягу визначає напруження металу в поздовжньому напрямку при деформації металу в ЗРП, а також стабільність та продуктивність процесу волочіння з подальшим протягуванням через пристрій.

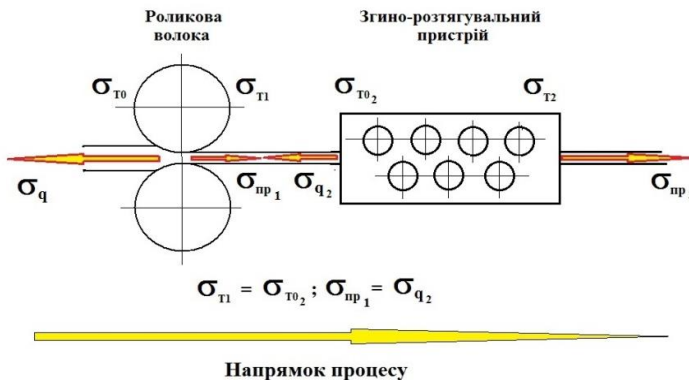


Рисунок 1 – Схема процесу волочіння в роликівій волоці поєднаного з протягуванням штаби через ЗРП.

Відомо [10], що ефективна обробка катанки в роликівому ЗРП супроводжується її відносним подовженням Δ зовнішніх шарів заготовки, який зазвичай дорівнює 6-12 %. Це впливає на величину опору металу деформації при наступному волочінні. Однак, з поля

зору дослідників випав очевидний факт зміни перерізу катанки на вході у роликову волоку, пов'язаного з ним значенням відносного подовження Δ . В результаті фактичний номінальний діаметр d_0 заготовки на вході в волоку відрізняється від діаметра d_k катанки.

Чинниками, які ускладнюють теоретичне визначення величини відносного подовження Δ , є:

- зміна положення нейтральної лінії деформації в процесі згину і розгину катанки на роликах ЗРП під впливом поздовжніх напруг, що розтягують;

- невизначеність співвідношення між пластичною та пружною зонами деформаціями штаби, що виникають при цьому;

- взаємодія роликів ЗРП.

Останнє має на увазі, що сила протягування катанки через i -тий ролик є силою заднього натягу для $(i+1)$ -го ролика. Відсутність відповідних даних призводить до неточності визначення технологічних параметрів процесу волочіння.

Облік вищезазначених чинників може бути досягнутий поетапним вирішенням наступних завдань:

- складання рівняння енергетичного балансу деформування металу в роликах ЗРП з урахуванням зазначених особливостей процесу та визначення повної сили протягування;

- визначення складової сили протягування, що пов'язана з пружно-пластичним вигином металу на роликах;

- кількісне визначення деформації катанки в роликах ЗРП з урахуванням фактичного положення нейтральної лінії деформації та кількості циклів обробки.

У роботі [16] з урахуванням зазначених особливостей було розроблено метод розрахунку силових параметрів процесу та формозміни катанки в згино-розтягувальному роликовому пристрої з комплексним урахуванням взаємної залежності механічних властивостей, температури, ступеня деформації та сили протягування металу.

Для розрахунку силових параметрів та формозміни процесу деформації штаби в згино-розтягувальному роликовому пристрої за основу прийняти метод розроблений у роботі [16].

Основні положення, які були розроблені у роботі [16], для випадку деформації штаби в згино-розтягувальному роликовому пристрої будуть мати наступний вигляд.

Сумарна сила $Q_{\Sigma i}$ протягування штаби між $1 \dots i$ ($I = 1 \dots n$) послідовними роликами n -роликового пристрою визначається (рис. 2) за формулою:

$$Q_{\Sigma i} = \sum_1^i Q_{i1} + Q_0, \quad (1)$$

де Q_0 – сила заднього натягу для першого ролика; Q_{li} – сила протинатягу штаби через i -тий ролик, яка визначається трьома складовими та враховує місце їх формування і фізичне походження (пружно-пластичний згин заготовки на ролику, тертя на контакті заготовки з поверхнею ролика і тертя у підшипнику ролика):

$$Q_{li} = 2 \cdot Q_{(y-n)i} \cdot \frac{\rho_{oi}}{\rho_{cpi}} + f \cdot P_i \cdot \frac{R_p}{\rho_{cpi}} + f_n \cdot P_i \cdot \frac{d_u}{2 \cdot \rho_{cpi}} \quad (2)$$

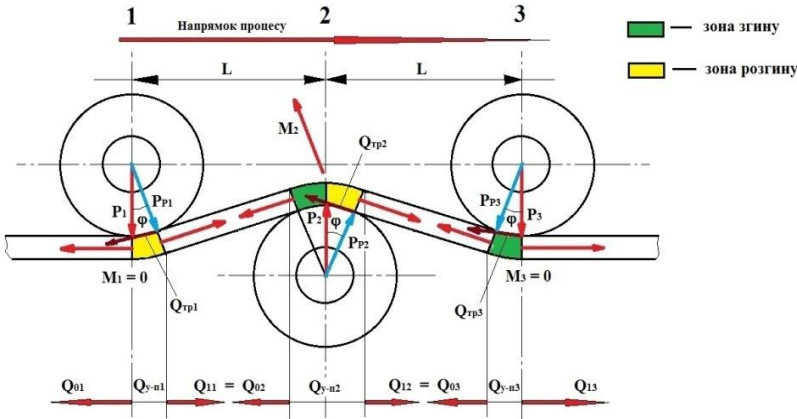


Рисунок 2 – Схема дії сил при деформації штаби у трироликовому ЗРП.

Пружно-пластична складова сили протяжки складається з виразу:

$$Q_{(y-n)} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\sigma_{Ti}^2}{E \cdot k_i \cdot h_{pi}} \cdot \left\{ \sqrt{\left[\left(\frac{h_{pi}}{2} \right)^2 - (y_{oi} + c_{oi})^2 \right]^3} + \sqrt{\left[\left(\frac{h_{pi}}{2} \right)^2 - (y_{oi} - c_{oi})^2 \right]^3} \right\} - \frac{\sigma_{Ti}^2}{E} \cdot \left\{ F_i - (y_{oi} + c_{oi}) \cdot \sqrt{\left(\frac{h_{pi}}{2} \right)^2 - (y_{oi} + c_{oi})^2} - \left(\frac{h_{pi}}{2} \right) \cdot \arcsin \frac{2 \cdot (y_{oi} + c_{oi})}{h_{pi}} \right. \\ \left. - (y_{oi} - c_{oi}) \cdot \sqrt{\left(\frac{h_{pi}}{2} \right)^2 - (y_{oi} + c_{oi})^2} - \left(\frac{h_{pi}}{2} \right) \cdot \arcsin \frac{2 \cdot (y_{oi} - c_{oi})}{h_{pi}} \right\} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_{yi}^2}{E \cdot y_{oi}} \cdot \left\{ 2 \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{h_{pi}}{2} \right)^2 - c_{oi}^2 \right]^3} - \sqrt{\left[\left(\frac{h_{pi}}{2} \right)^2 - (y_{oi} + c_{oi})^2 \right]^3} - \sqrt{\left[\left(\frac{h_{pi}}{2} \right)^2 - (y_{oi} - c_{oi})^2 \right]^3} \right\}, \quad (3)$$

де $y_{oi} = \frac{k_i \cdot h_{pi}}{2}$ – координата границі зон пружної та пластичної

деформації заготовки на i -тому ролику; $k_i = \frac{2 \cdot \sigma_{Ti}}{E \cdot h_{pi}} \cdot \rho_{oi}$ – коефіцієнт

пружної зони деформації [19]; $h_{pi} = \frac{h_0}{\sqrt{\mu_{\Sigma pi}}}$ – висота штаби після i -того ролика; h_0 – вихідна висота штаби; $\mu_{\Sigma pi}$ – сумарний коефіцієнт витяжки металу після i -того ролика; σ_{Ti} – границя плинності металу; E – модуль пружності I-ого роду (модуль Юнга), Н/мм²; $c_{oi} = \rho_{cpi} - \rho_{oi}$ – зміщення нейтральної осі деформації відносно серединної лінії профілю.

Сила P_i радіального впливу штаби на ролик з урахуванням аналізу, виконаного в роботі [17], визначається за формулою:

$$P_i = (Q_{\Sigma i} + Q_{\Sigma(i-1)}) \cdot \sin \varphi, \quad (4)$$

де $Q_{\Sigma(i-1)} = Q_{oi}$ – сила заднього натягу штаби на i -тому ролику.

Відповідно до [20] згин штаби в її поздовжньому перерізі характеризують: серединна лінія з радіусом ρ_{cp} , нейтральна лінія напружень з радіусом ρ_n , нейтральна лінія деформації з радіусом ρ_d , внутрішній і зовнішній діаметри r_B і R_H відповідно (рис. 3).

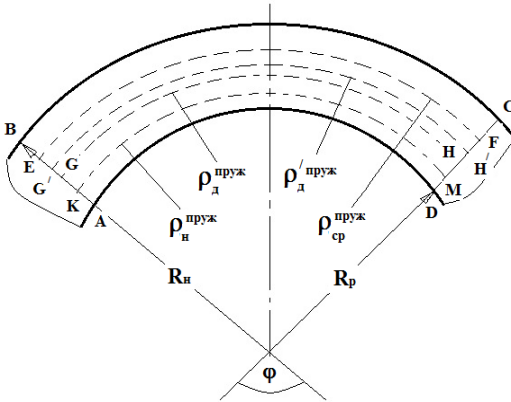


Рисунок 3 – Характерні лінії повздовжнього перерізу при згині заготовки на ролику пристрою.

Характерні радіуси згину визначаємо за формулами:

ρ_{cpi} – радіус серединної лінії профілю заготовки на ролику з радіусом R_p :

$$\rho_{cpi} = R_p + \frac{h_{pi}}{2}; \quad (5)$$

ρ_{oi} – радіус нейтральної лінії деформації:

$$\rho_{oi} = \frac{\rho_{ni} + \rho_{cpi}}{2}; \quad (6)$$

ρ_{ni} – радіус нейтральної лінії напружень:

$$\rho_{ni} = \sqrt{\frac{R_p \cdot (R_p + h_{pi})}{2 \cdot \exp\left(\frac{Q_{li} + Q_{oi}}{2 \cdot h_{pi} \cdot \beta \cdot \sigma_{Ti} \cdot R_p}\right)}}, \quad (7)$$

де Q_{oi} – сила заднього натягу на i -тому ролику.

Усі характерні радіуси згину визначають з урахуванням коефіцієнта k_{yi} пружної віддачі штаби на ролику, який згідно з [19] приймали рівним:

$$k_{yi} = \frac{L}{\rho_{cpi}} \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot R_p \cdot Q_{\Sigma i}}{\pi \cdot h_{pi}^3 \cdot \sigma_{Ti}}\right) \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{Ti} \cdot \rho_{cpi}}{E \cdot h_{pi}}\right), \quad (8)$$

де L – відстань між осями сусідніх роликів пристрою в напрямку протягування.

Особливістю вигину (згину і розгину) є те, що положення нейтральної лінії деформації не постійне. Вона зміщується одночасно із залученням у процес формозміни все нових обсягів металу з моменту початку деформації до її кінця. Причому вихідні обсяги металу накопичують деформацію в процесі всього циклу вигину, а обсяги на нейтральній лінії напружень практично не деформуються.

Тому середній ступінь деформації ε_{3i} при згині визначають як відношення половини зміщеної площі GEFH до площі ABCD перерізу штаби в секторі φ (див. рис. 3):

$$\varepsilon_{3i} = \frac{(\rho_{cpi}^{пруж} - \rho_{oi}^{пруж}) \cdot \rho_{oi}^{пруж}}{2 \cdot h_{3i} \cdot \rho_{cpi}^{пруж}}, \quad (9)$$

де $h_{3i} = \frac{h_0}{\sqrt{\mu_{\Sigma 3i}}}$ – висота штаби після згину на i -тому ролику (рис. 4);

$\mu_{\Sigma 3i}$ – сумарний коефіцієнт витяжки металу після згину на i -тому ролику з урахуванням історії деформування на попередніх роликах (рис. 4).

Аналогічно (9) деформація ε_{p1} при розгині визначається як відношення половини зміщеної площі GG'H'H до площі ABCD перерізу штаби в секторі φ (див. рис. 3):

$$\varepsilon_{p1} = \frac{(\rho_{oi}^{пруж} - \rho_{cpi}^{пруж}) \cdot \rho_{oi}^{пруж}}{2 \cdot h_{pi} \cdot \rho_{cpi}^{пруж}}, \quad (10)$$

де $h_{pi} = \frac{h_0}{\sqrt{\mu_{\Sigma pi}}}$ – висота штаби після розгину на i -тому ролику (рис. 4);

$\mu_{\Sigma ci}$ – сумарний коефіцієнт витяжки металу після *розгину* на i -тому ролику з урахуванням історії деформування на попередніх роликах (рис. 4); $\rho_{oi}^{пруж}$ – радіус нейтральної лінії деформації при розгині штаби згідно [21] визначається за формулою:

$$\rho_{oi}^{пруж} = \rho_{spi}^{пруж} - \frac{h_{pi}}{4} \cdot \frac{\sigma_{pi}}{\beta \sigma_{Ti}}. \quad (11)$$

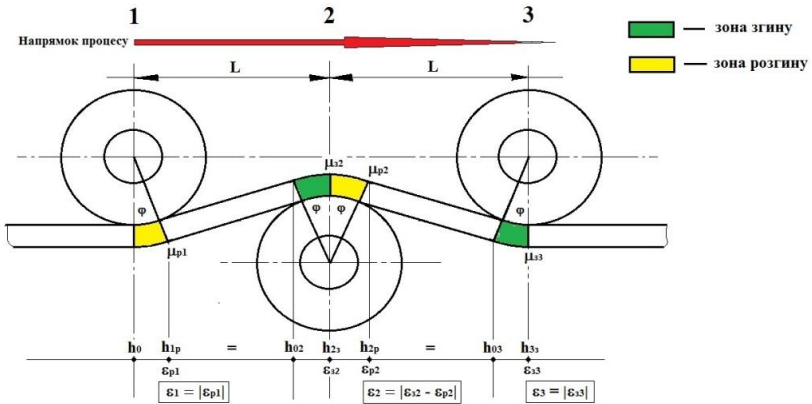


Рисунок 4 – Схема деформації штаби у трироликовому ЗРП.

Результуючу деформацію штаби після її згину-розгину на ролику згідно [21] визначають як різницю:

$$\varepsilon_i = |\varepsilon_{ci} - \varepsilon_{pi}|. \quad (12)$$

Розрахунок зміцнення металу при його обробці за схемою «розтягування – знакозмінний вигин», за даними роботи [22], повинен враховувати такі основні фактори:

- деформація подовження здійснюється переважно поза контактом із роликами, тобто на ділянках між направляючими роликами та роликами, які працюють на згин;

- залишкова деформація (подовження прокату) залежить від напруги розтягування, а так само від утворених у ході деформації додаткових напруг та співвідношення величин моментів вигину зон стиснення та розтягування;

- накопичена пластична деформація суттєво більша від залишкової деформації за рахунок згину з подальшим розгином прокату;

- зміцнення металу необхідно розраховувати за величиною накопиченої, а не залишкової деформації.

Основними параметрами процесу «розтяг - знаковмінний вигин», за даними роботи [22], що впливають на механічні властивості металу є:

- протинатяг перед першим роликком (Q_0),
- кут охоплення роликів (φ),
- відношення діаметра роликів до діаметра (висоти) прокату (D/d або D/h).

Розрахунок зміни границі плинності представлений у роботі [16] не враховує усі основні фактори, перераховані вище.

В роботі [23] авторами був проведений аналіз впливу різних факторів на зміну механічних властивостей арматурного прокату у процесі «розтягування – знаковмінний вигин», який дозволив запропонувати наступні залежності для розрахунку властивостей міцності:

$$\sigma_{T,1} / \sigma_{T,0} = (1 + 650 \cdot \varepsilon_u^{0,5} / \sigma_{T,0}) \cdot K_{ИЗТ}; \quad (13)$$

$$\sigma_{B,1} / \sigma_{B,0} = (1 + 500 \cdot \varepsilon_u^{0,76} / \sigma_{B,0}) \cdot K_{ИЗВ}; \quad (14)$$

де коефіцієнти $K_{ИЗТ}$, $K_{ИЗВ}$ залежать від сумарного ступеня деформації вигином і параметрів процесу знаковмінного вигину (протинатягу перед першим роликком, кута охоплення роликів, відношення діаметра роликів до діаметра прокату).

На основі даних про вплив сумарного ступеня деформації знаковмінним вигином (без суттєвої деформації розтягуванням) на зміну механічних властивостей прокату, отриманих авторами роботи [23] при виконанні промислових та лабораторних експериментів, для орієнтовних розрахунків рекомендується приймати значення зазначених коефіцієнтів, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів корекції механічних властивостей металу після обробки знаковмінним вигином.

Стан прокату	Показник	Значення коефіцієнтів корекції залежно від ступеня деформації знаковмінним вигином						
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
зміцнений деформацією	σ_T	0,99	0,98	0,99	1,00	0,99	0,98	0,95
	σ_B	0,98	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93
не зміцнений деформацією	σ_T	1,02	1,03	1,035	1,035	1,025	1,00	0,98
	σ_B	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,01	0,99

Наведені значення коефіцієнтів враховують експериментально встановлені закономірності, які полягають у тому, що за відсутності наклепу вихідної заготовки на першій стадії її деформування знаковмінним вигином відбувається зміцнення металу, хоча й меншою

мірою, ніж при деформації розтягуванням або прокаткою. Однак, по мірі накопичення дислокацій, створюються умови для зниження границі міцності та збільшення пластичних властивостей металу.

Таким чином, для розрахунку зміни границі плинності металу у процесі деформації штаби у роликовому ЗРП приймаємо метод представлений у роботі [23].

На підставі вище наведених основних положень розглянутих методик визначення енергосилових параметрів процесу деформування в ЗРП в подальшому буде розроблено алгоритм та математична модель для розрахунку силових параметрів та параметрів формозміни процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій. Математична модель для розрахунку енергосилових параметрів та параметрів формозміни процесу протягування штаби через ЗРП дозволить проводити обґрунтований вибір параметрів знакозмінного вигину штаби.

Висновки

1. В результаті аналізу визначена методика розрахунку силових параметрів процесу та формозміни катанки в згино-розтягувальному роликовому пристрої з комплексним урахуванням взаємної залежності ступеня деформації, сили протягування металу.

2. В якості методики визначення зміни механічних властивостей у процесі деформації штаби у роликовому згино-розтягувальному пристрої прийняли методику, яку розробили раніше в ІЧМ НАНУ.

3. Обрані методики слугують у подальшому для розробки математичної моделі розрахунку енергосилових параметрів та параметрів формозміни процесу протягування штаби через згино-розтягувальний пристрій, що дозволить проводити обґрунтований вибір параметрів знакозмінного вигину штаби.

Перелік посилань

1. Гулько В. И., Войцеховский В. А., Григорьев А. К. *Производство профилей и проволоки в роликовых волоках*. Ижевск : Удмуртия, 1989. – 67 с.

2. Красавин Б. Н., Бояршинов М. И., Поляков М. Г. Использование роликовых волок за рубежом. *Информация. Серия 9 «Метизное производство»*. М. : ЦНИИЧермет, 1971. № 2. С. 11-16.

3. Повышение эффективности процессов волочения в роликовых волоках / А. В. Выдрин, А. А. Штерн, Ю. Н. Попов, Б. В. Баричко // *Труды пятого конгресса прокатчиков*. М. : Черметинжиринг, 2004. С. 385-387.

4. Храмов В. Е., Штерн А. А., Яковлева К. Ю. К вопросу проектирования роликовых волок со смещенными парами роликов. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2015. Т. 15. № 4. С. 128-134.

5. Тарнавский А. Л. Силовые условия волочения с использованием роликовых окалиноломателей. *Сталь*. 1965. № 2. С. 182-184.

6. Юхвец И. А. *Волоочильное производство*. Ч. 1. М. : Metallurgy, 1965.

374 с.

7. Недовизий И. Н., Петрухин С. И., Комаров А. Г. *Совмещение процессов производства проволоки*. М. : Металлургия, 1979. 224 с.

8. Шумилин И. М. Волочение стальной проволоки с применением механического удаления окалины. *Производство промышленных металлических изделий: сб. ВНИИметиз*. М. : Металлургия, 1967. № 1. С. 129-148.

9. Должанский А. М., Ломов И. Н., Ключев Д. Ю. Эффективность использования механического удаления окалины при волочении стальной катанки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 3. С. 60-61.

10. Коковихин Ю. И. *Технология сталепроволочного производства*. К. : Техника, 1995. 608 с.

11. Битков В. В. *Технология и машины для производства проволоки* Екатеринбург : УрО РАН, 2004. 344 с.

12. Радионова Л. В., Харитонов В. А., Сафонов Е. В. *Волочение высокоуглеродистой проволоки с применением знакопеременного изгиба*. Магнитогорский государственный технический университет. Магнитогорск, 2001. – 10 с. Деп. в ВИНТИ 22.08.2001, №1892-B2001.

13. Киреев И. Н. Подготовка катанки к волочению с предварительной ломкой окалины. *Сталь*. 1968. № 3. С. 281-282.

14. Ломов И. Н. Разработка и освоение эффективной технологии сухого волочения стальной катанки после механического удаления окалины: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05. Днепропетровск, 2003. 142 с.

15. Залазинский А. Г., Битков В. В. Расчет усилия протягивания катанки через ролики окатиноломателя. *Сталь*. 1995. № 8. С. 54-56.

16. Метод расчета параметров бесфильерного волочения стальной катанки в роликовом окатиноломателе / А. М. Должанский, О. Б. Ломова, О. С. Ермакова [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 2. С. 53-57.

17. Должанский А. М., Ломов И. Н., Ломова О. Б. Определение температуры при протяжке катанки через роликовый окатиноломатель. *Теория и практика металлургии*. 2007. № 6. С. 40-45.

18. Радионова Л. В. Математическое моделирование знакопеременной деформации изгибом в многороликовом устройстве. *Изв. Вузов. Черная металлургия*. 2013. № 9. С. 62-66.

19. Королев А. А. *Конструкция и расчет машин механизмов прокатных станов*. М. : Металлургия, 1985. 376 с.

20. Сторожев М. В., Попов Е.А. *Теория обработки металлов давлением*. М. : Машиностроение, 1971. 424 с.

21. Должанский А. М., Ермакова О. С. Деформация катанки в роликовом окатиноломателе. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 1. С. 58-61.

22. Харитонов В. А., Иванцов А. Б., Харитонов В. А. Обработка бунтовой арматурной стали по схеме «растяжение – знакопеременный изгиб» (теория, технология, оборудование. *Металлург*. 2010. № 4. С. 29-33.

23. Разработка сквозных технологий производства горяче- и холоднодеформированного арматурного проката, обеспечивающих повышение пластичности при заданном уровне прочности: отчет о НИР (закончен.):

ПС.015.12 / ИЧМ НАНУ; рук. Воробей С.А.; исполн: Раздобреєв В.Г. [и др.]. – Днепропетровск, 2016. – 275 с. – № госрегистрации 0112U360.

References

1. Gul'ko, V. I., Voytsekhovskiy, V. A., & Grigor'yeв, A. K. (1989). *Proizvodstvo profiley i provoloki v rolikovykh volokakh*. Udmurtia
2. Krasavin, B. N., Boyarshinov, M. I., & Polyakov, M. G. (1971). Ispol'zovaniye rolikovykh volok za rubezhom. *Hardware production*, 2, 11-16
3. Vydrin, A. V., Shtern, A. A., Popov, Yu. N., & Barichko, B. V. (2004). Povysheniye effektivnosti protsessov volocheniya v rolikovykh volokakh, *Trudy pyatogo kongressa prokatchikov*, Moskva, Chernetinzhiring
4. Khramkov, V. E., Stern, A. A., & Yakovleva K. Yu. (2015). K voprosu proyektirovaniya rolikovykh volok so smeshchennymi parami rolikov. *Vestnik SUSU*, 15(4), 128-134
5. Tarnavskiy, A. L. (1965). Silovyye usloviya volocheniya s ispol'zovaniyem rolikovykh okalinolomateley. *Steel*, 2, 182-184
6. Yukhvets, I. A. (1965). *Volochil'noye proizvodstvo: Ch. 1. Metallurgiya*
7. Nedoviziy, I. N., Petrukhin, S. I., & Komarov, A. G. (1979). *Sovmeshcheniye protsessov proizvodstva provoloki. Metallurgiya*
8. Shumilin, I. M. (1967). Volocheniye stal'noy provoloki s primeneniyyem mekhanicheskogo udaleniya okaliny. *Manufacturing of industrial metal products*, 1, 129-148
9. Dolzhanskiy, A. M., Lomov, I. N., & Klyuyev, D. Yu. (2000). Effektivnost' ispol'zovaniya mekhanicheskogo udaleniya okaliny pri volocheniі stal'noy katanki. *Metallurgical and mining industry*, 3, 60-61
10. Kokovikhin, Yu. I. (1995). *Tekhnologiya staleprovolochnogo proizvodstva. Tekhnika*
11. Bitkov, V. V. (2004). *Tekhnologiya i mashiny dlya proizvodstva provoloki. UrO RAN*
12. Radionova, L. V., Kharitonov, V. A., & Safonov, Ye. V. (2001). Volocheniye vysokouglerodisty provoloki s primeneniyyem znakoperemennogo izgiba. *Magnitogorsk State Technical University*, 1-10
13. Kireyev, I. N. (1968). Podgotovka katanki k volocheniyyu s predvaritel'noy lomkoy okaliny. *Steel*, 3, 281-282
14. Lomov, I. N. (2003). *Development and mastery of effective technology for dry drawing of steel wire rod after mechanical descaling* (Masters dissertation). National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk
15. Zalazinskiy, A. G., & Bitkov, V. V. (1995). Raschet usiliya protyagivaniya katanki cherez roliki okalinolomatelya. *Steel*, 8, 54-56
16. Dolzhanskiy, A. M., Lomova, O. B., Yermakova, O. S., & Lomov, I. N. (2008). Metod rascheta parametrov besfil'yernogo volocheniya stal'noy katanki v rolikovom okalinolomatele. *Metallurgical and mining industry*, 2, 53-57
17. Dolzhanskiy, A. M., Lomov, I. N., & Lomova, O. B. (2007). Opredeleeniye temperatury pri protyazhke katanki cherez rolikovyy okalinolomatel'. *Theory and practice of metallurgy*, 6, 40-45
18. Radionova, L. V. (2013). Matematicheskoye modelirovaniye znakoperemennoy deformatsii izgibom v mnogorolikovom ustroystve

[Mathematical modeling of alternating bending deformation in a multi-roller device]. *Izv. Universities. Ferrous metallurgy*, 9, 62-66

19. Korolev, A. A. (1985). *Konstruktsiya i raschet mashin mekhanizmov prokatnykh stanov*. Metallurgiya

20. Storozhev, M. V., & Popov Ye. A. (1971). *Teoriya obrabotki metallov davleniyem*. Mashinostroyeniye

21. Dolzhanskiy, A. M., & Yermakova, O. S. (2006). Deformatsiya katanki v rolikovom okalinolomatele. *Metallurgical and mining industry*, 1, 58-61

22. Kharitonov, V. A., Ivantsov, A. B., & Kharitonov, V. A. (2010). Obrabotka buntovoy armaturnoy stali po skheme «rastyazheniye – znakopremennyy izgib» (teoriya, tekhnologiya, oborudovaniye). *Metallurgist*, 4, 29-33

23. Vorobey, S. A. (2016). *Razrabotka skvoznykh tekhnologiy proizvodstva goryache- i kholodnodeformirovannogo armaturnogo prokata, obespechivayushchikh povysheniye plastichnosti pri zadannom urovne prochnosti*. 0112U360: Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, National Academy of Science of Ukraine

V. G. Razdobrev¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7402-7992
I. Yu. Prykhodko¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0001-5651-8106

K. Yu. Kluychnikov¹, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-2465-3244

D. G. Palamar¹, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-9503-3248

A. I. Leshchenko¹, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-1877-8358

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

CHOICE OF THE METHOD OF DETERMINING THE ENERGY-FORCE PARAMETERS OF THE PROCESS OF DRAWN OF THE STACK THROUGH A BENDING-TENSIONING DEVICE

Abstract. In the practice of manufacturing metal products, shaped profiles of a complex configuration, including thin-walled, strip and periodic cross-section profiles, play a special role. High-quality, high-precision shaped profiles with different ratio of the width to the height of the tape, which are produced in small-tonnage batches abroad and are widely used in machine-building, instrument-building, aircraft-building and other industries. In Ukraine, the production of high-precision shaped profiles is extremely limited, and the production of strip-type profiles is completely absent. Tape-type shaped profiles are usually produced by cold deformation on drawing, flattening or sheet-rolling mills. The use of drawing in roller drawing in comparison with cold rolling and flattening has higher technological flexibility, does not require large capital costs for the organization of production. Compared to traditional drawing with the use of monolithic drags, the drawing process in roller drags has the following advantages: lower energy consumption; higher permissible deformation per pass; higher homogeneity of product properties, expensive drawing lubricants are not used, additional special metal preparation operations for drawing are not carried out (phosphating, oxalate, copper plating, brown coating, etc.). The main drawback of the roller drag method is

the presence of traction force. Tensions that stretch the profile in combination with a decrease in plasticity of the metal during the drawing process can lead to the destruction of the rolled product. In order to eliminate the harmful effects of residual tensile stresses, it is necessary to either eliminate them or convert them into compressive stresses that increase the workability of the steel billet. For this purpose, two methods are used in the practice of wire production: thermal and mechanical. The thermal method used in industry requires significant energy consumption. The mechanical method has several varieties, of which the most rational is the process of sign-changing deformation with wire stretching in a bending-stretching device. The process of cold deformation with the use of a bending-stretching device is carried out with a counter-tension, the value of which is equal to the effort of drawing the workpiece through this device. The counter-tension determines the force of cold deformation and the power of the drive motor of the traction device, the value of the maximum possible deformation during the first pass, the stability of the cold deformation process and other parameters. When working with a large back tension, frequent breaks in the rolling stock are possible. Therefore, it is very important to correctly calculate the force of cold deformation using bending and stretching roller devices. The purpose of the work: on the basis of the performed analysis, to choose a technique for determining the energy parameters of the process of drawing the staffs through the bending and stretching device. As a result of the analysis, the method of calculating the force parameters of the process and the change in shape of the wire rod in the bending-stretching roller device with comprehensive consideration of the mutual dependence of the degree of deformation, the tensile strength of the metal, and the changes in mechanical properties during the deformation process was determined. The headquarters in the roller bending-tension device adopted the methodology that was developed earlier in the ISI of the National Academy of Sciences of Ukraine. The chosen methods serve in the future for the development of a mathematical model for calculating energy parameters and shape change parameters of the process of stretching the staffs through the bending-stretching device, which will allow for a reasonable choice of the parameters of the sign-changing bending of the staffs.

Key words: method of determining power parameters, sign-changing deformation with stretching, tape type profiles, mechanical properties, bending and stretching roller device.

For citation: Razdobreev, V. G., Prykhodko, I. Yu., Kluychnikov, K. Yu., Palamar, D. G., & Leshchenko, A. 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*, 37, 358-373. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-358-373>

*Стаття надійшла до редакції збірника 20.10.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*