

РОЗДІЛ «ПРОКАТНЕ ВИРОБНИЦТВО»

УДК 621.771.01

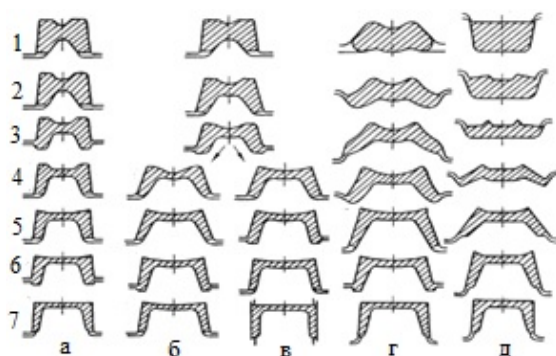
ЄРШОВ С.В., д.т.н., професор
КРАВЧЕНКО К.О., асистент
РОМАНЮХА Р.А., магістр
ФИЛОНЕНКО А.А., студент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОЗКАТУ
ПРИ ПРОКАТУВАННІ ШВЕЛЕРІВ В УМОВАХ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА

Вступ. Профілі, осі окремих елементів котрих розташовані під деяким кутом (частіше за все 90°) до частини, яка їх з'єднує, називаються фланцевими [1]. До таких профілів відносяться балки, швелери, рейки, таврові профілі та інші [2]. Форма цих профілів значно відрізняється від форми заготовки, тому їх неможливо отримати шляхом використання рівномірного обтиснення розкату. Через це є неминучою нерівномірність деформації, що призводить до складного напружено-деформованого стану [3].

Швелер (англ. Channel) – металопродукт з поперечним перерізом у вигляді літери П із заокругленими внутрішніми кінцями. Він використовується як елемент опорних конструкцій в будівництві (ферм, перекриттів, мостів) та машинобудуванні (рам, корпусів).



- а) – зі збільшеним нахилом полиць та прямою стінкою (коритний спосіб);
- б) – зі збільшеним нахилом полиць та зігнутою стінкою;
- в) – з використанням універсального чистового калібру;
- г) – з розгорнутими полицями та вигнутою стінкою;
- д) – згинанням прямих полиць

Рисунок 1 – Способи прокатування швелерів [2]

вали калібри коритного типу, але із значно меншими хибними фланцями (рис.1, а). Недоліками коритного способу є труднощі входу розкату в чистовий калібр, а також низька стійкість чистового калібру із-за малого випуску. Також великий вріз канавок у валки не дозволяє розширювати сортамент в сторону збільшення розмірів. Зазначені недоліки усуваються завдяки застосуванню калібрів з прямими полицями і вигнутою стінкою. У таких калібрах (рис.1, б) випуск збільшують до 20-40%, а кут між середньою лінією стінки і зовнішньої гранню кожної полиці зберігають рівним 90° . У чорнових

Швелери прокатують двома основними способами [4, 5]: з прямими і розгорнутими полицями. Для прокатування швелерів з прямими полицями відомо кілька методів калібрування валків (рис.1): балковий, коритний (рис.1, а-в). Калібрування валків з розгорнутими полицями розділяють за методом їх згинання (рис.1, г) та з вигином стінки і полиць (рис.1, д).

У першій половині ХХ ст. швелери виготовляли переважно балковим способом [5]. Однак такий спосіб прокатування виявився доволі енерговитратним і призвів до підвищеного зносу валків, тому у сучасному виробництві він не використовується.

Відмінністю коритного способу від балкового було те, що в чорнових проходах використову-

калібрах застосовують випуск до 40%, а в передчистовому і чистовому калібрах – до 10-15%.

Готовий швелер також отримують шляхом гарячого вигину профілю з використанням універсального чистового калібру (рис.1, в). При цьому всі чистові розміри швелера отримують в попередньому калібрі із вигнутою стінкою і випуском 25-30%.

Виготовлення швелерів способом згинання прямих фланців (рис.1, д) дозволило забезпечити відповідність жорстким вимогам до економічних профілів. Цей спосіб вважається подальшим розвитком коритного способу [6].

Більш досконалим, ніж попередні, є спосіб прокатування швелерів за розгорнутим калібруванням (рис.1, г). Саме цей спосіб вважається найбільш розвиненим у країнах колишнього СРСР.

Постановка задачі. Раціональний спосіб калібрування і режим обтиснень значно впливають на якість продукції, знос робочого інструменту і витрату енергоресурсів. Різні вчені, серед яких Д.І.Старченко, А.П.Чекмарьов, І.Я.Тарновський, Б.М.Ілюкович, Г.В.Бергеман та ін., в різний час займалися дослідженнями процесу деформації та розробкою методик для розрахунку калібрувань фасонних профілів. Однак при загальному підвищенні технологічного рівня обладнання і зростанні вимог до якості продукції існує необхідність розробки і вдосконалення існуючих методів калібрувань для умов сучасного виробництва.

Таким чином, робота, спрямована на розвиток методів розрахунку параметрів розгорнутого калібрування валків і розробку на їх основі ефективної технології виробництва швелерів із досягненням при цьому високих техніко-економічних показників виробництва металопродукції, є актуальною.

Результати роботи. Для моделювання напружено-деформованого стану при прокатуванні швелера №8 за ГОСТ 8240-97 за основу взято розгорнуте закрите калібрування, розроблене компанією DANIELI-Morgardshammar для стану 400/200 ПАТ «ДМК». Для розрахунку обрано другий фасонний калібр, розташований в першій клітці проміжної групи (кліть № 11), в який задається фасонний підкат із кліть №9. Вибір пояснюється великою нерівномірністю деформації, що спостерігається при прокатуванні в даному калібрі.

Теоретичний розрахунок виконано за допомогою програмного пакету ESV Deform, розробленого на кафедрі ОМТ ДДТУ. Цим програмним пакетом в якості математичного апарату для апроксимації полів швидкостей плинну металу використовується метод скінчених елементів.

Для виконання моделювання схеми деформації і напруженого стану металу в калібрі кліть №11 обрано наступні налаштування програми: була використана чотирикутна сітка з розмірами елемента 3×4×8 мм. Тип скінчених елементів – прямокутна призма

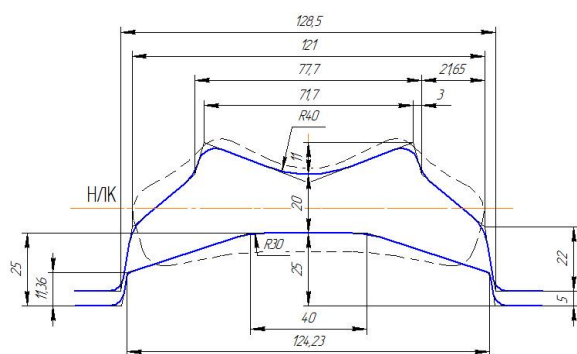


Рисунок 2 – Форма калібру і підкату, що задається в кліть №11

з 8 вузлами. В якості алгоритму рішення використано метод штрафних функцій. Температура початку прокатування прийнята 1030°C. Діаметр верхнього валка по бурту дорівнює 535 мм, нижнього – 411 мм. Швидкість прокатування – 3,11 м/с, кількість обертів – 111 об/хв., температура валків – 20°C. Матеріал – сталь С10, $\sigma_{80}=90$ МПа.

В цей калібр задається фасонний підкат габаритними розмірами 120,5×43 мм. Креслення калібру представлено на рис.2.

За підсумками моделювання нами отримано тривимірний осередок деформації із зовнішніми зонами. Для аналізу обрано три перерізи: площина в момент контакту металу з валками на вході в осередок деформації; площина в осередку деформації після контакту всієї поверхні розкату з калібром на відстані 20 мм до вертикальної осі валків; площина, яка відповідає вертикальній осі валків.

Результати розрахунку мають вигляд кольорових полів. При цьому кожен колір відповідає певному числовому значенню досліджуваного параметра. Дослідження полів швидкостей при прокатуванні швелера в момент контакту металу з валками на вході в осередок деформації представлено на рис.3.

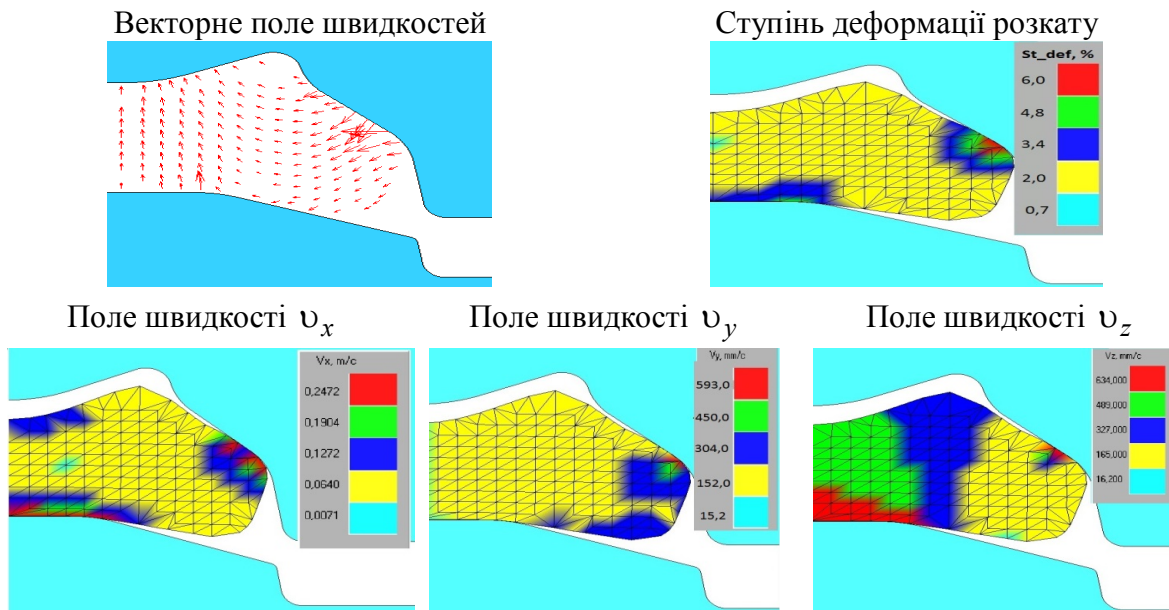


Рисунок 3 – Отримані поля на стадії початкового захвату підкату на вході в осередок деформації

У першу чергу метал контактує з валками по гребеню нижнього валка, а також бічними гранями зовнішньої сторони фланців торкається похилих частин калібру, що спричиняє вигин всього розкату і утворення форми більш наближеної до форми готового швелера. Найбільший плин металу спостерігається в місцях контакту розкату з валками. При цьому, внаслідок обтиснення в області стінки метал перетікає в сторону верхнього рівчака калібру.

У поздовжньому напрямку найвища швидкість плину спостерігається в зонах контакту металу з валками, в поперечному – по краях полиць, які прагнуть поширитися, заповнивши калібр, а у висотному напрямку плин металу має найвищу швидкість в зоні контакту з нижнім гребенем. Зона з більш інтенсивною швидкістю розповсюджується в сторону верхнього рівчака в місцях переходу стінки у фланці.

Ступінь деформації якісно відповідає картині векторного поля швидкостей. Найвищі значення цього параметра дорівнюють всього 6%, оскільки метал тільки входить в осередок деформації, і розпочинається процес його обтиснення.

Отримавши уяву про плин металу в різних напрямках в першому перерізі, проаналізуємо схему напружень на вході металу в осередок деформації. Отримані поля зображено на рис.4.

Схема розподілу напружень у поздовжньому і поперечному напрямках якісно однакова, у висотному напрямку більшість зон розтягуючих напружень із значеннями, близькими до максимальних, знаходяться по верхньому рівчаку на контактні розкату з



Рисунок 4 – Схема напружень на вході в осередок деформації

валками. На ділянках, що не обтискаються, та у середніх шарах розкату по всіх напрямках діють стискаючі напруження до 53 МПа.

Перейдемо до аналізу полів швидкостей у перерізі, який розташований після контакту з валками всіх частин розкату на відстані 20 мм до вертикальної осі валків. Отримані в ході розрахунку поля зображено на рис.5.

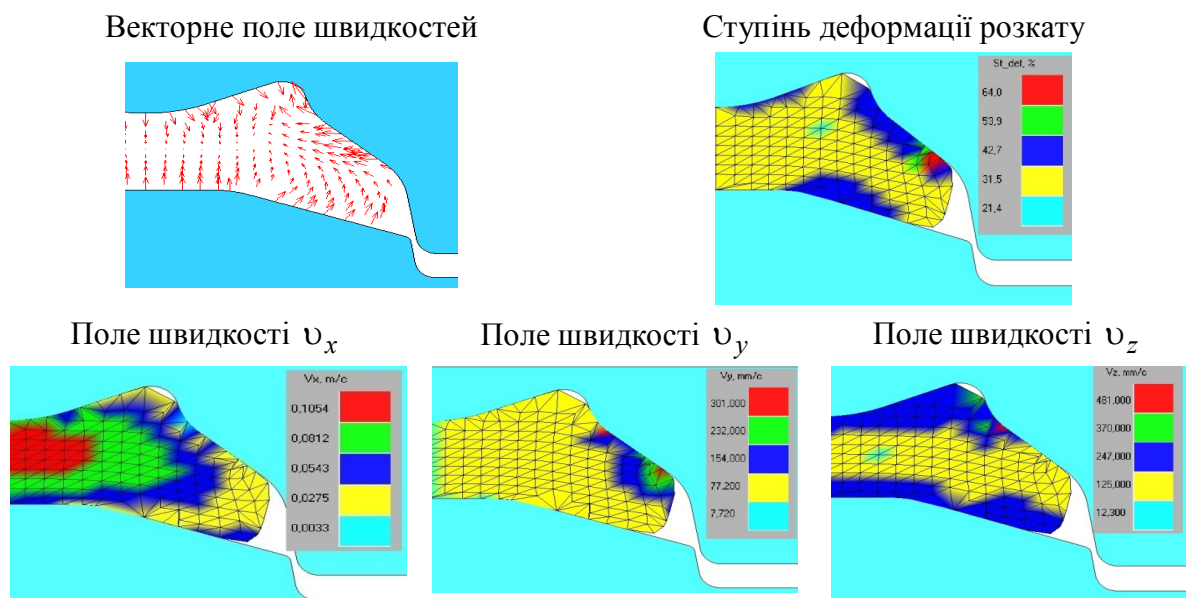


Рисунок 5 – Отримані поля для перерізу, що знаходиться на відстані 20 мм від осі валків

Із рис.5 видно, що в цьому перерізі розкат майже рівномірно деформується у всіх частинах, окрім зовнішніх граней полиць, які деформуються з трохи більшою інтенсивністю. Там спостерігається більш активний плин металу.

У поздовжньому напрямку зона з найбільшою швидкістю v_x знаходиться в середніх шарах розкату в області стінки, а далі поступово зменшується від центру до країв. В поперечному напрямку значення швидкості v_y здебільшого невисокі, окрім зовнішніх країв полиць, де спостерігаються найбільші значення. Це пояснюється значним обтисненням цієї області. У висотному напрямку є дві зони з більш високою швидкістю v_z , які знаходяться в місцях контакту металу з валками зі сторони верхнього і нижнього рівчачка, і зона з меншою швидкістю в області середньої лінії калібру. Такий плин пов'язаний зі ступенем деформації, найбільша величина якого спостерігається в поверхневих шарах металу, що безпосередньо контактують з валками.

Ступінь деформації найвищий в зонах контакту металу з валками по фланцях, які піддаються одночасно обтисненню і згину, та сягає 40-65%.

Проаналізуємо схему напруженого стану в даному перерізі. Отримані поля напружень зображено на рис.6.

По всьому перерізу розкату спостерігається переважно рівномірний напружений стан. У всіх трьох напрямках переважають стискаючі напруження величиною до 90 МПа, за виключенням окремих зон на верхній грані полиць ближче до їх країв, де діють розтягуючі напруження 65-90 МПа, а також окремих ділянок в поверхневих шарах стінки розкату.



Рисунок 6 – Схема напруженого стану у перерізі, що знаходиться на відстані 20 мм до вертикальної осі валків

Проаналізуємо третій для даного калібра поперечний переріз, який відповідає вертикальній осі валків. Отримані поля швидкостей зображено на рис.7.

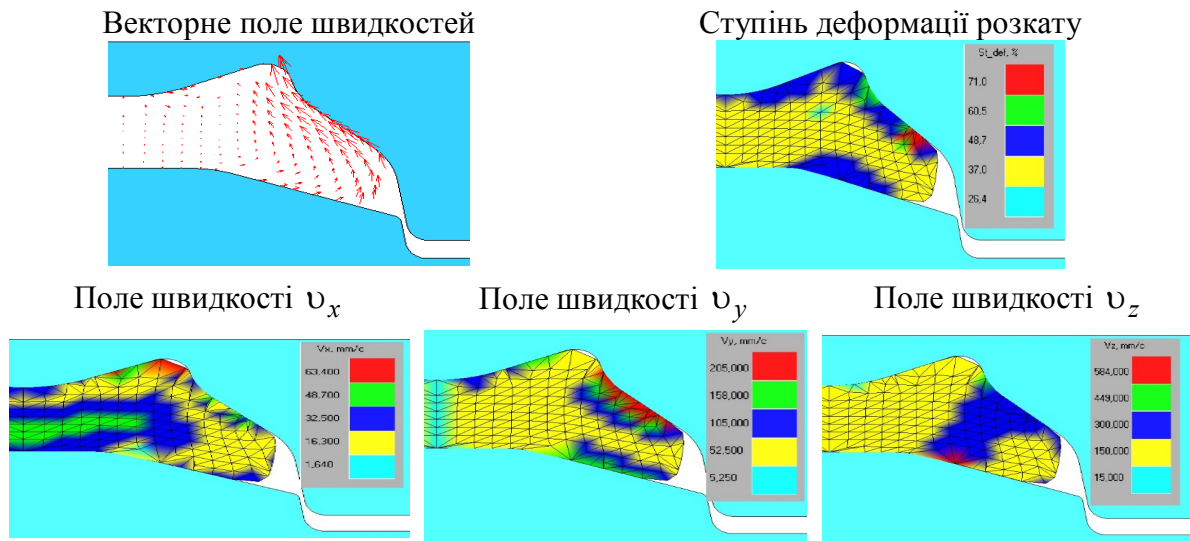


Рисунок 7 – Отримані поля швидкостей у перерізі, що відповідає вертикальній осі валків

Як видно із рис.7, деформація стінки розкату майже відсутня, але деформація полиць продовжується з високою інтенсивністю. Плин металу направлений у сторону верхнього рівчачка на заповнення ділянок хибних фланців.

У поздовжньому напрямку схема плин металу в цілому не змінилася в порівнянні з попереднім перерізом, але зони зі збільшеним значенням швидкості знаходяться на вершинах хибних фланців, що пов'язано з активним плином металу в їхній бік. У поперечному напрямку швидкість плин металу в середніх шарах розкату рівномірна. Винятком є ділянки контакту полиць розкату з валками. У вертикальному напрямку по

стілці і в області хибних фланців швидкість рівномірна. Зони зі збільшеною швидкістю розташовані по фланцях ближче до стінки.

Ступінь деформації в середніх шарах розкату складає приблизно 40%, у зовнішніх зонах в місцях контакту розкату з валками – 50%, а ближче до країв полиць в зоні контакту з верхнім валком має найвище значення – 65%, оскільки ця частина найбільш інтенсивно обтискається валками.

Згідно зі схемою калібрування прокатування ведеться в закритих калібрах, які одночасно виконують роль контрольних калібрів, необхідних для регулювання і контролю розміру полиць. З результатів моделювання видно, що має місце недозаповнення калібру кліті №11 по ширині на 6 мм. Це означає протікання процесу прокатування в умовах вільного поширення без контролю ширини фланців.

Проаналізуємо отриману схему напружень в даному перерізі. Отримані поля зображено на рис.8.

Напружений стан майже рівномірний. У всіх трьох напрямках переважають стискаючі напруження величиною до 55 МПа, окрім окремих зон по краях фланців і по стінці зі сторони верхнього валка, де переважають розтягуючі напруження.



Рисунок 8 – Схеми напружень для перерізу, що відповідає вертикальній осі валків

Висновки. Проведено комплексний аналіз напружено-деформованого стану металу без спрощення форми інструменту і заготовки. Було встановлено наступне: в швелерному калібрі кліті №11 деформація по стінці калібру розподілена рівномірно і ступінь деформації має невисокі значення, при цьому деформація полиць проходить дещо інтенсивніше, що пов'язано із великим обтисненням і згином фланців; у перерізі входу розкату в осередок деформації напружений стан є найбільш нерівномірним, тут спостерігаються переходи від розтягуючих до стискаючих напружень, що може стати причиною утворення тріщин на готовому профілі. Має місце недозаповнення закритого калібру по ширині. Внаслідок зміни умов прокатування (коливань температури металу, величини зношування та ін.) може відбуватися нерівномірний знос калібру і невиконання розмірів готового профілю після закінчення прокатки. Існує необхідність коригування розмірів досліджуваного калібру задля його оптимальної роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бахтинов Б.П. Калибровка прокатных валков / Б.П.Бахтинов, М.М.Штернов. – М.: Металлургиздат, 1958. – 784с.
2. Илюкович Б.М. Прокатка и калибровка: справочник в 6 т. / Б.М.Илюкович, Н.Е.Нехаев, В.П.Капелюшный. – Днепропетровск: РИА «Днепро-вал», 2004. – Т.5: Калибровка швелерообразных и корытообразных профилей. – 2004. – 481с.
3. Коновалов Ю.В. Металлургия: учебное пособие в трех книгах. Т. 3 / Ю.В.Коновалов, А.А.Минаев. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013. – 603с.

4. Совершенствование технологии производства сортовых профилей на стане 600 ОАО «АМК» / М.Б.Луцкий, И.К.Дорожко, А.А.Чичкан, В.А.Луценко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – №8-9. – С.188-192.
5. Чичкан А.А. Разработка элементов теории и технологии производства швеллеров с применением в фасонных калибрах переменного изгиба стенки: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.03.05 / А.А.Чичкан. – Донецк, 2000. – 21с.
6. Илюкович Б.М. Расчет и конструирование калибров при прокатке швеллеров по методу сгибания / Б.М.Илюкович // *Сталь*. – 1964. – №6. – С.532-534.

Надійшла до редколегії 27.04.2017.

УДК 621.771.01

МАКСИМЕНКО О.П., д. т. н., профессор
ПРИСЯЖНЫЙ А.Г.*, к. т. н., доцент
КУЗЬМИН Е.В., аспирант
КОСТРИЦА А.А., магистр

Днепропетровский государственный технический университет, г. Камянское
*Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОМЕНТА ПРИ ПРОКАТКЕ С НАТЯЖЕНИЕМ ПОЛОСЫ

Введение. При определении момента прокатки с натяжением полосы обычно пользуются известной формулой [1]:

$$M_{np.} = P_{общ.} \cdot \psi \cdot l_d + \frac{Q_1 - Q_0}{4P_{cp} R b f_y}.$$

В приведенном выражении общая равнодействующая всех контактных сил $P_{общ.}$ направлена вертикально. Однако при прокатке со значительными натяжениями эта сила может существенно отклоняться от вертикали, что приводит к ошибкам в расчете момента. Кроме того, как показано в работах [2-4], в очаге деформации действует среднеинтегральная результирующая продольных сил $Q_{cp,np.}$ пластически деформируемого металла, что увеличивает отклонение силы $P_{общ.}$ от вертикали.

Постановка задачи. В настоящем исследовании предложено определять момент прокатки с натяжением полосы, исходя из равнодействующей нормальных давлений P (рис.1) с учетом угла приложения этой силы ψ_1 и результирующей продольных сил $Q_{cp,np.}$.

Результаты работы. Как видно из рис.1, силы P_x , $Q_{cp,np.}$ и Q_0 действуют противоположно по отношению к направлению прокатки и образуют момент сопротивления. Активные силы $T_{омс} - T_{он}$ и Q_1 создают момент и обеспечивают устойчивость процесса прокатки, преодолевая момент сопротивления. Устойчивый процесс прокатки соблюдается, если выполняется следующее условие:

$$2 \cdot (T_{омс} - T_{он}) \cdot R + Q_1 \cdot \left(R + \frac{h_1}{2} \right) = Q_{cp,np.} \cdot \left(R + \frac{h_1}{2} \right) + 2P_x \cdot \left(R - \frac{\Delta h_{\psi_1}}{2} \right) + Q_0 \cdot \left(R + \frac{h_1}{2} \right), \quad (1)$$

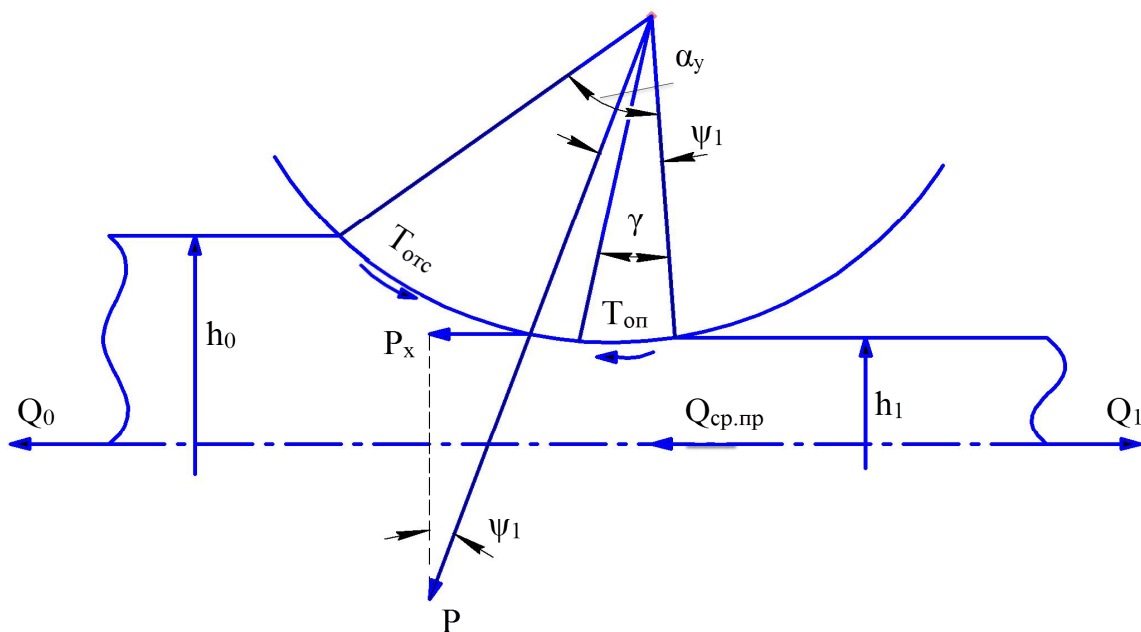


Рисунок 1 – Схема действующих сил

где $P_x = P \cdot \sin \psi_1$; $Q_{cp.pr.} = Q_{cp.pr.}^* \cdot 2k_{cp} R b$; $P = p_{cp} \cdot l_c \cdot b$; $Q_0 = \sigma_0 \cdot h_0 \cdot b$;

$$Q_1 = \sigma_1 \cdot h_1 \cdot b; T_{omc} - T_{on} = f_y \cdot p_{cp} R b \cdot (\alpha_c - 2 \cdot \gamma),$$

T_{omc} и T_{on} – равнодействующие удельных сил трения в зонах отставания и опережения;

Q_0 и Q_1 – силы заднего и переднего натяжения полосы;

$Q_{cp.pr.}^*$ – безразмерная результирующая продольных сил;

P – результирующая продольных напряжений P_x ;

Δh_{ψ_1} – обжатие полосы в сечении, соответствующему углу ψ_1 ;

ψ_1 – угол приложения равнодействующей P ;

γ – угол нейтрального сечения с учётом действия сил Q_0 и Q_1 , а также продольной силы $Q_{cp.pr.}$;

α_c и l_c – сплюснутые угол захвата и длина очага деформации;

p_{cp} и $2k_{cp}$ – средние значения давления и сопротивления деформации,

$$2k_{cp} = \beta \sigma_s;$$

b – ширина прокатываемой полосы.

Ввиду того, что $R \gg \Delta h_{\psi_1}$, сумму этих величин принимаем равными радиусу валков. После некоторых преобразований имеем:

$$\left(R + \frac{h_1}{2} \right) \cdot \left[Q_{cp.pr.}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right] + 2 \cdot \frac{p_{cp}}{2k_{cp}} l_c \psi_1 = 2 f_y \cdot \frac{p_{cp}}{2k_{cp}} \cdot R_c \cdot (\alpha_c - 2 \cdot \gamma) \cdot R. \quad (2)$$

Из последнего выражения найдём угол приложения равнодействующей:

$$\psi_1 = f_y \cdot \left(1 - \frac{2\gamma}{\alpha_c}\right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{R + \frac{h_1}{2}}{l_c} \cdot \frac{1}{\frac{P_{cp}}{2k_{cp}}} \cdot \left[Q_{cp,np.}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right]. \quad (3)$$

Как видно, с увеличением результирующей $Q_{cp,np.}^*$ и заднего натяжения полосы угол приложения равнодействующей P уменьшается. С ужесточением режима трения и ростом переднего натяжения полосы он увеличивается.

Заметим, что полный момент сопротивления, который необходимо преодолеть валкам с учетом натяжения полосы и действия результирующей продольных сил в очаге деформации определяются:

$$M_{np.n} = \left(R + \frac{h_1}{2}\right) \cdot \left[Q_{cp,np.}^* + Q_0 - Q_1 \right] + 2P_x \cdot R. \quad (4)$$

После некоторых преобразований имеем:

$$\begin{aligned} M_{np.n} &= \left(R + \frac{h_1}{2}\right) \cdot \left[Q_{cp,np.}^* \cdot 2k_{cp} R b + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \cdot h_0 b_0 2k_{cp} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \cdot h_1 b_1 2k_{cp} \right] + \\ &+ 2 \frac{P_{cp}}{2k_{cp,x}} \cdot R l_c b 2k_{cp} \psi_1 \cdot R; \\ M_{np.n} &= \left(R + \frac{h_1}{2}\right) \cdot \left[Q_{cp,np.}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right] \cdot 2k_{cp} R b + \frac{2P_{cp}}{2k_{cp,x}} l_c \psi_1 \cdot 2k_{cp} R b; \\ M_{np.n} &= 2k_{cp} R b \left\{ \left(R + \frac{h_1}{2}\right) \cdot \left[Q_{cp,np.}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R} \right] + \frac{2P_{cp}}{2k_{cp,x}} l_c \psi_1 \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

Рассчитаем угол ψ_1 приложения равнодействующей нормальных давлений и определим величину момента прокатки при деформации металла с натяжением и учетом результирующей продольных сил $Q_{cp,np.}^*$ в очаге деформации для условий, приведенных в работах [5, 6], и сравним полученные данные с опытными. В книге [5] М.М.Сафьян привел результаты исследования энергосиловых и других параметров при горячей прокатке листовой стали в чистовой группе клетей непрерывного стана 1680. Для случая прокатки тонкого листа поперечными размерами 3x1400 мм из стали 3кп, параметры которого приведены в табл.1, рассчитали согласно методике [4] эпюры контактных и горизонтальных нормальных напряжений σ_x , кроме того, рассчитали эпюры текущих продольных сил и их среднеинтегральное результирующее значение в очаге деформации. Это позволило определить угол ψ_1 и $M_{np.n}$. Результаты расчетов и опытные данные показаны в табл.1.

Как видно, результирующая $Q_{cp,np.}^*$ по всем клетям чистовой группы стана направлена противоположно движению полосы, из чего следует, что процесс прокатки

совершается устойчиво, без частичных пробуксовок. Угол ψ_1 близок к углу нейтрального сечения γ , что соответствует выводам А.А.Королева, приведенным в [6].

Таблица 1 – Параметры деформации, опытные данные и результаты расчета момента прокатки при деформации полосы на стане 1680

№ келети	h_1	R_{cn}	$\alpha_{cнл}$	f	$\frac{\sigma_0}{\beta\sigma_s}$	$\frac{\sigma_1}{\beta\sigma_s}$	$Q_{cp,np}^*$	$\frac{P_{cp}}{\beta\sigma_s}$	γ	ψ_1	M_{np} , кН·м		Расхожд.
	мм	мм	рад.								расчет	опыт	
5	13,62	305	0,209	0,3	0	0,28	-0,0203	1,34	0,078	0,061	630	781	-19
6	8,33	305	0,131	0,23	0,28	0,2	-0,0006	1,03	0,037	0,073	410	385	6
7	5,61	342	0,089	0,18	0,2	0,14	-0,0028	1,16	0,03	0,054	297	270	9
8	4,28	367	0,059	0,18	0,14	0,23	-0,0025	1,17	0,025	0,015	136	157	13
9	3,37	388	0,048	0,18	0,23	0,13	-0,0020	1,22	0,018	0,018	120	100	17
10	3,0	409	0,03	0,18	0,13	0,01	-0,0019	1,25	0,013	0,016	38	47,5	-20

Аналогичные расчеты были выполнены при анализе опытной холодной прокатки ленты начальной толщины 1,95 мм и ширины 30 мм, приведенные в работе [6]. В этих опытах заднее и переднее натяжения изменялись в широких пределах. Кроме того, эксперимент включал измерение нормального давления, сплюсненной длинны очага деформации, силы и момента прокатки. Геометрические параметры, результаты опытов и теоретических расчетов приведены в табл.2, из которой следует, что расчетный момент $M_{np,n}$ близок к опытным данным.

Таблица 2 – Результаты расчетов и опытные данные холодной прокатки с натяжением полосы

№ обр.	h_1	R_{cn}	α_{cn}	f	$\frac{\sigma_0}{2k_{cp}}$	$\frac{\sigma_1}{2k_{cp}}$	$Q_{cp,np}^*$	$\frac{P_{cp}}{2k_{cp}}$	γ	$2k_{cp}$	ψ_1	M_{np} , кН·м		Расхожд.
	мм	мм	рад.									рад.	Н/мм ²	
90	1,4	344	0,04	0,11	0,021	0	-0,0024	1,54	0,016	445	0,014	155	144	7
91	1,32	308	0,045	0,12	0,389	0	-0,0005	1,13	0,012	435	0,032	265	224	15,5
92	1,3	262	0,05	0,22	0,674		-0,0003	1,13	0,012	440	0,03	305	272	11
93	1,63	319	0,032	0,11	0,021	0	-0,0018	1,33	0,013	400	0,02	124	110	11
94	1,5	282	0,04	0,13	0,317	0	-0,0004	1,1	0,011	420	0,031	274	300	-9,5
95	1,36	325	0,043	0,13	0,015	0,37	-0,0034	1,74	0,017	435	0,021	212	176	17
96	1,35	249	0,049	0,13	0,015	0	-0,0024	1,32	0,024	440	0,01	142	112	21
97	1,32	346	0,043	0,11	0	0	-0,0027	1,65	0,017	445	0,016	181	160	12
98	1,3	254	0,051	0,13	0,28	0,08	-0,0014	1,27	0,016	445	0,027	256	250	2
99	1,2	231	0,057	0,24	0,668	0,289	-0,0007	1,18	0,016	450	0,023	275	230	16

Во всех случаях теоретическое значение момента превышает экспериментальное. При существенном заднем натяжении полосы (обр. 92 и 99) теоретически процесс совершается устойчиво только при ужесточении режима трения ($f_y > 0,2$). Практически, в случаях, когда $\frac{\sigma_0}{2k_{cp}} = 0,5-0,7$, прокатка ведётся в предельных условиях (обр. 91, 92, 94). Устойчивость процесса несколько повышается, если к полосе приложено значительное переднее натяжение (обр. 99). Эти выводы основаны на анализе результиру-

ющей продольных сил $Q_{ср.пр.}^*$. Важно также подчеркнуть, что при прокатке без натяжения (обр. 97) составляющая момента, связанная с силой $Q_{ср.пр.}^*$ (4), примерно равна половине от $2P_x \cdot R$. Последнее указывает на то, что результирующей продольной силой при анализе силовых условий пренебрегать не следует.

Выводы. Предложена методика расчета момента при прокатке полосы с натяжением. При его определении исходили из равнодействующей нормальных давлений, угла приложения этой силы в очаге деформации, а также из результирующей продольных сил пластически деформируемого металла и режима натяжения.

Результаты сравнения опытных и расчетных данных показали, что предложенная методика может быть рекомендована для определения момента при прокатке с натяжением полосы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А.П. Теория прокатки / А.П.Грудев. – [изд. 2-е перераб. и доп.] – М.: СП Интермет Инжиниринг, 2001. – 280с.
2. Максименко О.П. Уточнение условий продольной устойчивости процесса прокатки / О.П.Максименко, Р.Я.Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – №1. – С.41-43.
3. Максименко О.П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, Р.Я.Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №6. – С.47-49.
4. Максименко О.П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, М.К.Измайлова. - Днепро-дзержинск: ДГТУ, 2016. – 213 с.
5. Сафьян М.М. Прокатка широкополосной стали / М.М.Сафьян.- М.: Metallurgia, 1969. – 460с.
6. Королев А.А. Новые исследования деформации металла при прокатке / А.А.Королев. – М.: Машгиз, 1953. – 267с.

Поступила в редколлегию 28.02.2017.