

## 4.11. Несиметричні процеси прокатки штаб

Несиметричний процес характеризується різними умовами деформації верхніх і нижніх шарів штаби і він у тій чи іншій мірі присутній в будь-яких умовах прокатки. Симетричного (ідеального) процесу під час прокатки не існує. Завжди є різні умови деформації верхніх і нижніх шарів штаби, які обумовлені відмінністю [52, 61]:

- діаметрів або колової швидкості валків;
- станом поверхонь верхнього і нижнього валків;
- нагріву і стану верхньої та нижньої поверхонь штаби;
- нахилу штаби на вході у валки та інш.

Перші фундаментальні дослідження кінематичних і силових параметрів несиметричної прокатки виконано А.А. Корольовим, в яких установлено суттєвий вплив різних діаметрів валків на випередження, середні нормальні контактні напруження, силу і крутний момент прокатки. Автор відзначає, що валок більшого діаметра  $D_б$  (з більшою коловою швидкістю) буде прагнути переміщувати штабу з більшою швидкістю, ніж валок меншого діаметра  $D_м$  (з меншою коловою швидкістю). По цій причині валок з  $D_м$  буде являтися гальмом по відношенню до валка з  $D_б$  і дія його буде подібною дії заднього натягування. По відношенню до меншого валка з  $D_м$  валок з  $D_б$ , який має більшу колову швидкість, буде утворювати в штабі передне натягування. Як відомо із теорії прокатки, задне натягання збільшує крутний момент прокатки, а передне – зменшує. Виходячи із цього, на валку більшого діаметра крутний момент збільшується, а на меншому валку – знижується порівняно з симетричним процесом прокатки. Дія зрівноважених напружень заднього і переднього натягувань викликає деяке зниження підпираючих поздовжніх напружень і, отже, нормальних напружень під час прокатки в осередку деформації і сили прокатки.

Під час гарячої і холодної прокатки штаб різниці діаметрів верхнього і нижнього робочих валків у межах 0,2 мм дозволена технічними умовами з метою спрощення підбору комплекту. Крім того, профільовані валки мають різницю діаметрів по довжині бочки в межах 0,2...0,5 мм.

В дослідях [74] встановлено, що при гарячому прокатуванні штаб товщиною 2,5 і 6,0 мм у валках з відмінністю колових швидкостей в 1...5% сила прокатки знижується на ~ 5...18%. Однак момент кручення суттєво зростає.

Штаба, яка прокатується на станах, як правило, відхилена до одного із валків. Нахил штаби перед входом у валки утворює неоднакові умови захвату мастила. За даними [25], зі сторони валка, до якого відхилена штаба, товщина шару мастила більша, ніж із сторони другого валка і збільшується по мірі збільшення кута нахилу штаби. В дослідженнях [20, 52, 61] встановлено нерівномірний розподіл обтиску і крутного моменту на валках, нерівномірність зносу верхнього і нижнього робочих валків. Причому, менші величини обтиску і крутного моменту прокатки приходяться на валок, до якого відхилена штаба. В кліті №1 неперервного стана 1680 холодної прокатки нахил штаби до нижнього насіченого валка на кут  $0,7...2,0^{\circ}$  після прокатки 200...300 т металу приводить до зменшення шорсткості поверхні з 4...5 мкм до 0,4...0,65 мкм  $R_a$ . Шорсткість верхнього валка увесь період його роботи зберігається на рівні 3,5...4 мкм  $R_a$ . Усунення перекошення вхідного кінця штаби в цій кліті забезпечує практично однаковий знос поверхонь робочих валків. Аналогічна нерівномірність зносу насічених валків спостерігається і в кліті №4, де більш інтенсивно зношується шорсткість верхнього валка, до якого відхилена штаба.

Штаби низьковуглецевої сталі, які назначають на рекристалізаційний відпал, прокатують в холодному стані на робочих валках з насіченими поверхнями ( $R_a \approx 3...6$  мкм). Наявність такої шорсткості зумовлює значні навантаження на валки і головний привод. Зниження навантажень досягається зменшенням сумарної шорсткості валків шляхом заміни одного насіченого валка шліфованим ( $R_a \approx 1...1,2$  мкм). Лабораторні

дослідження і промислова експлуатація різношорстких валків на реверсивному стані 1200 свідчать про високу ефективність процесу. Порівняно з прокаткою в насичених валках поліпшується якість штаб, зменшується навантаження на валки і головний привод на 5...10%, підвищується експлуатаційна стійкість валків. Недоліком прокатки в різношорстких валках є нерівномірність розподілення крутних моментів (більший момент на насиченому валку, де більше значення коефіцієнта тертя). Компенсувати цю нерівномірність можна застосуванням валків різного діаметра. При цьому валок з більшим діаметром виготовляють із шліфованою поверхнею.

В деяких випадках (під час прокатки товстих листів) зміною шорсткості одного із валків виявляється можливим регулювати напрям згибу переднього кінця листа. Так, на стані 2500 (Росія) в симетричних умовах тертя під час прокатки розкатів із алюмінію і його сплавів з  $H > 80$  мм передні кінці на виході із валків мали вигин на верхній валок, а при  $H < 80$  мм вигин переднього кінця відбувався на нижній валок і при транспортуванні по рольгангу відбувались затримки, які збільшували час пауз. Застосування нижнього валка з меншою шорсткістю ( $R_a \approx 2,2...2,5$  мкм проти 3...4 мкм на верхньому) забезпечує прокатку розкатів і листів з  $H < 80$  мм без вигину на нижній валок [75]. В результаті компенсації однієї несиметрії (нахил розкату на вході до нижнього валка) несиметричний процес перейшов у категорію симетричного за рахунок збільшення обтиснення із сторони нижнього валка. Це привело до вирівнювання крутних моментів на шпінделях і зменшення простоїв стана для заміни бронзових вкладишів шпіндельних пристроїв.

#### 4.12. Валки станів холодної прокатки

Для виготовлення робочих валків холодної прокатки застосовують високоякісні сталі, які містять мінімальну кількість шкідливих домішок (табл. 4.5). Технологія виробництва робочих валків холодної прокатки складається із металургійного та механічного циклів. Основними операціями металургійного циклу є: виплавка і розливка сталі, ковка і

попередня термічна обробка заготовок (гомогенний відпал), кінцева термічна обробка. Цикл механічної обробки включає токарні, сверлильні, фрезерні, розточні, шліфувальні і слюсарні операції. Загартування і низьке відпущення забезпечують високу твердість указаних сталей. Режим поверхневого загартування в індукторі складається із попереднього підігріву бочки до 650...670<sup>0</sup>С, наступного нагріву до температури загартування (890...930<sup>0</sup>С) і швидкого охолодження водою, яка подається на поверхню за допомогою розбризкувача (спрейера) під тиском 0,3...0,7 МПа. Нагрів і загартування валків роблять у вертикальному положенні при рухомих індукторі і спреєрі. Після загартування валки піддають низькотемпературному відпущенню, режим якого зумовлений маркою сталі і потрібною твердістю поверхні. Так, для отримання твердості валків із сталі 9Х – 93...95 HSD температура відпущення знаходиться у межах 160...170<sup>0</sup>С, а для отримання твердості 97...100 HSD (стані для прокатки жерсті) температура відпущення 140...150<sup>0</sup>С.

Стійкість робочих валків холодної прокатки залежить від режиму деформації, швидкості прокатки, температури валків, умов охолодження і якості самих валків. Збільшення обтисків викликає підвищення контактних напружень, а збільшення швидкості прокатки, при незмінних умовах охолодження, підвищення температурних напружень. Обидві ці обставини приводять до погіршення умов служби робочих валків. За даними вимірювань температура валків в процесі експлуатації знаходиться у межах 50...70<sup>0</sup>С. При цьому в більшій мірі нагрівається середня частина довжини бочки валків, а максимальний градієнт температур між серединою і краєм бочки складає в кліті №1 до ~ 30<sup>0</sup>С, із зменшенням в кліті №4 до 10<sup>0</sup>С (ШСХП 1680). Вироботка робочих валків також нерівномірна і максимум її розташовується у середній частині довжини. Максимальна нерівномірність зносу (до ~ 0,2 мм) також приходить на кліть №1, де використовують робочі валки з насиченою поверхнею, а мінімальна – в кліті №4, що зумовлено більш частішими перевалками і необхідністю отримання якісного поперечного профілю штаб (рис. 4.17).

Робочі валки станів холодної прокатки виходять повністю із ладу по природному зносу робочого загартованого шару (~ 20мм), але в основному по наварам, порізам, відколам. Навар металу на валки відбувається внаслідок пориву штаби в процесі прокатки. В цьому випадку при втраті натягання і великому місцевому тиску метал наварюється на поверхню валків після чого приходиться усувати пошкоджений загартований шар на 2...4 мм по діаметру. Сильні навари викликають наступні відшарування або глибокі викришування, які приводять до остаточного виходу валка із ладу. Поріз валків відбувається при невідповідності режиму деформації і профілювання валків. В цьому випадку нерівномірність деформації по ширині штаби приводить до утворення складки перед входом у валки і місцевий надав валків. Одним із найбільш поширених дефектів валків холодної прокатки, які пройшли поверхневе загартування, є відшарування загартованого шару. Звичайна глибина місцевих відшарувань і колового відкалування бочки знаходиться у межах 2...25 мм. Відшарування (відколи) часто відбуваються на тих ділянках валків, де раніше відбулися навари, відколи, порізи. Відшарування також є результатом порушень технології загартування і відпуску валка.

На станах холодної прокатки і жерсті використовують складенні опорні валки: вісь виготовлена із сталі 50Х, 50ХН і т.п., а бандаж товщиною 200...300 мм із легованої сталі (9ХФ, 9Х2, 65ХСМФ і т.п.). Бандаж устанавлюється на вісь з гарячою посадкою і натягом при температурі нижче температури нагріву під загартування. Нагріті бандажі охолоджують 50...70 хв. в маслі. Відпуск бандажу роблять при температурах 360...380<sup>0</sup>С, охолоджують з піччю до температури 100<sup>0</sup>С і остаточне охолодження - на повітрі.

Таблиця 4.5. Хімічний склад сталі робочих валків холодної прокатки

Марка сталі	Склад <sup>х)</sup> %									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	V	W	
9X	0,8/0,95	0,2/0,35	0,25/0,45	0,03	0,03	1,4/1,7	-	-	-	-
9X2СВФ	0,8/0,95	0,2/0,35	1,3/1,6	0,03	0,03	1,7/2,1	-	0,1/0,2	0,3/0,6	-
60X2СМФ	0,57/0,65	0,2/0,4	1,1/1,3	0,03	0,03	1,8/2,1	0,25/0,35	0,1/0,2	-	-

<sup>х)</sup> В чисельнику – нижня границя, в знаменнику – верхня границя складу елемента.

При такій термічній обробці твердість бандажу знаходиться у межах 80...85 HSD. Твердість бандажу завжди нижча твердості робочих валків і це виключає перенесення дефектів опорного валка на поверхню робочих валків. Поряд зі зносом основними причинами виходу опорних валків із ладу є: викришування від значних контактних напружень і наклепу, поломки осей і шийок в результаті перевантажень, зміщення бандажу відносно осі, які можуть бути виключені при дотриманні технології виготовлення та експлуатації валків.

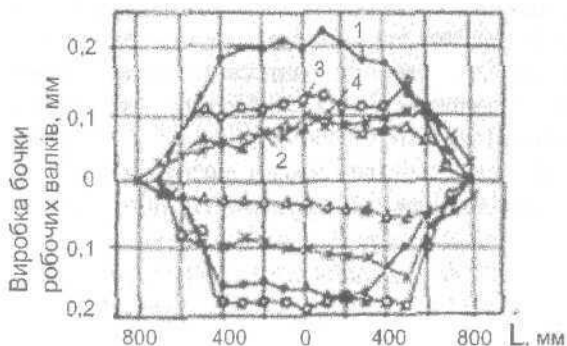


Рис.4.17. Знос за довжиною бочки робочих валків після прокатки: кліть 1-~1500 т, 2-~2000 т, кліть 3-3000 т, кліть 4-~1300 т (а-верхній валок; б-нижній валок).

Знос опорних валків нерівномірний по довжині бочок і, так як вони працюють в кліті без зміни на протязі 10...30 днів, значний. При незмінній середньозваженій ширині штаби нерівномірність розподілу міжвалкового тиску зумовлена спільною взаємодією профілювань опорних та робочих валків. Можливі різні варіанти профілювань та зносу опорних валків. Бочку опорних валків виконують циліндричної або випуклої форми з краєвими скосами (урізами) довжиною 75...300 мм, а робочі валки – циліндричними або випуклими. У випадку використання робочих валків з випуклим профілюванням ( $f_p = 0,1...0,5$  мм) опорні валки зношуються, як правило, в середині бочки, приводячи до появи угнутої форми утворюючої. По мірі збільшення нерівномірності зносу опорного валка випуклість робочих валків відповідним чином збільшують. Якщо опорні валки зношуються на випуклість, то величину початкової випуклості робочих валків треба зменшити.

### 4.13. Термічна обробка, дресування і обробка штаб

В процесі холодної деформації відбувається зміцнення металу, зниження пластичних властивостей і утворення текстури з витягнутими за напрямком прокатки зернами. При цьому напруження течії металу зростає із збільшенням обтиску (рис. 4.18), а відносне видовження зменшується для сталі 08кп з ~ 40% до 1...1,5%, тобто метал практично втрачає свої пластичні властивості. Тому зміцнений метал не можна застосовувати для штампування деталей. Для зниження міцності холоднокатаної сталі застосовують світлий рекристалізаційний відпал, який здійснюють в захисній атмосфері для запобігання окислення металу. Так як звичайно сумарна ступінь обтиску сталі під час холодної прокатки складає 60...75%, то температура відпалу в ковпакових печах знаходиться у межах точки  $A_{c1}$  ( $t_b \approx 650...710^\circ\text{C}$ ).

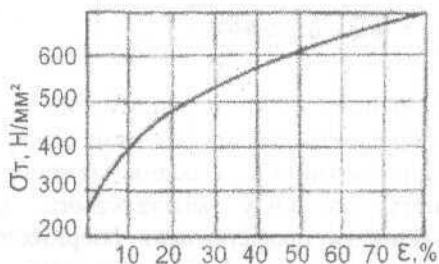


Рис. 4.18. Напруження течії сталі марки ст08кп залежно від сумарного обтиснення при прокатуванні

Дослідженнями [17] показано, що температура відпалу рулонів для отримання необхідних величин напруження течії металу необхідно встановлювати залежно від вмісту вуглецю в сталі і величини відносного обтискання при прокатуванні (рис. 4.18). З рис. 4.20 видно, що для отримання металу ( $C=0,06\%$ ) з напруженням течії  $\sigma_T=245\text{Н/мм}^2$  при  $t=690^\circ\text{C}$  необхідне попереднє сумарне обтискання, рівне  $\epsilon = 80\%$ . При зменшенні сумарного обтискання і вмісту вуглецю в сталі напруження течії



зменшується. Найменша величина напруження  $\sigma_T$  одержана при  $C=0,04\%$  і  $\varepsilon = 30\%$ ,

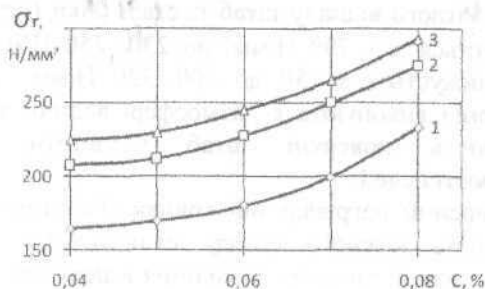


Рис. 4.19. Зміна напруження течії низьковуглецевої сталі після відпалу ( $t=690^{\circ}\text{C}$ ) залежно від змісту вуглецю при різних попередніх обтисках  $\varepsilon$ , %: 1-30; 2-50; 3-80 [17]

Одностопа колпакова піч світлого відпалу (рис. 4.20) включає: стэнд, на який встановлюються рулони, нагрівальний ковпак, муфель, конвекторні прокладки.

Одностопа ковпакова піч світлого відпалювання (рис. 4.20) включає: стэнд, на який устанавлюються рулони, нагрівальний ковпак, муфель, конвекторні між рулонні прокладки. Нагрівальний ковпак має металевий каркас, футерований вогнетривкою цеглою. Висота ковпака для станів 1700 дорівнює 5800...6000 мм і зовнішній діаметр 3000...4000 мм. Опалення печі робиться газом (природний, коксо-доменна суміш) крізь пальники, які розташовані у нижній частині ковпака. Після устанавки рулонів на стэнд, стопу накривають муфелем, засипають піщаний затвор і роблять холодну і гарячу продувку вентилятором підмуфельного простору захисним газом у вигляді:  $N_x$  – газу, в якому є 1,5...2,5%  $CO$ ;  $\leq 0,5\%$   $CO_2$ ; 1,7...2,4  $H_2$  і решта азот; газ із суміші азоту і водню ( $N_2 = 95...97\%$  і  $H_2 = 3...5\%$ ). Продувку підмуфельного простору роблять для усунення повітря. Тепловий режим відпалу складається із трьох періодів: підйом температури в печі до заданої; витримка при температурі 650...710<sup>0</sup>C (по стэндовій термопарі) на протязі 14...25 годин в залежності від марки сталі;

оохолодження під муфелем до  $t \approx 150^{\circ}\text{C}$  на протязі 40...50 годин (при зніманні муфеля при температурі вище  $150^{\circ}\text{C}$  відбувається окислення поверхні штаби у вигляді кольорів мінливості). В результаті світлого відпалу штаб із сталі 08кп (пс) напруження течії знижується з  $\sim 700 \text{ Н/мм}^2$  до  $230...250 \text{ Н/мм}^2$ , а границя міцності знижується з 750 до  $300...320 \text{ Н/мм}^2$ . В даний час відпал рулонів виконують в атмосфері водню, що забезпечує високу якість поверхні штаб і істотне підвищення продуктивності печей.

Один переносний нагрівальний ковпак обслуговує 3-4 стенди. Продуктивність кожного стенду складає 0,4-0,5 т/час. На існуючих станах останнього покоління в цеху встановлюють до 300 стендів з  $\sim 120$  нагрівальними ковпаками.

Тонколистову сталь іноді відпалюють в розпушених рулонах з метою поліпшення механічних властивостей, газового легування металу і підвищення продуктивності відпалювальних печей. При перемотуванні рулонів між витками по колу укладають жаростійкий дріт (прокладки), який утворює зазори для вільного доступу газу. Велика тривалість процесу відпалу в ковпакових печах і погіршення якості поверхні при зменшенні товщини штаби до 0,2 мм привели до розробки процесу безконежного відпалу, особливо ефективного при виробництві жерсті. Безперервний відпал штаби дає змогу отримувати велику продуктивність (до 30 т/год.) при швидкостях руху штаби до 10 м/с.

Після відпалу і оохолодження до  $t < 40^{\circ}\text{C}$  рулони передають на дресирувальний стан, який складається із однієї кліті (рис. 4.21). Дресирування – це прокатка штаби з невеликим обтиском (0,8...1,5%). Стан вкпочає в себе чотирьохвалкову кліть, розмотувач, натяжний пристрій штаби, моталку, пристрій для гідрорегулювання прогину робочих валків і прилади контролю величини обтиску. Дресирування роблять за один прохід при швидкості 10...20 м/с з метою підвищення пластичних властивостей металу і надання поверхні штаби певної шорсткості. Під час прокатки з обтискненням 0,8...1,5% відбувається зміцнення поверхневого шару штаби і усунення ділянки текучості на кривій напруження – деформація, що

запобігає утворенню ліній зсуву в процесі штампування із листа виробу. Дресування сприяє зменшенню напруження течії (границі текучості) металу, величина якого залежить від змісту вуглецю та попереднього обтиснення ( $\sigma_T=150-200 \text{ Н/мм}^2$ ). Після дресування на протязі часу відбувається старіння металу. В результаті штучного старіння на протязі 4 годин при  $100^\circ\text{C}$  (один рік природного старіння) у сталі 08кп (пс) границя текучості зростає з  $200 \text{ Н/мм}^2$  до  $245 \text{ Н/мм}^2$ , твердість HRB з 43 до 46,5, а при штампуванні з'являються на поверхні виробу лінії зсуву. Механічні властивості нестаріючої сталі 08ю в результаті старіння практично не змінюються.

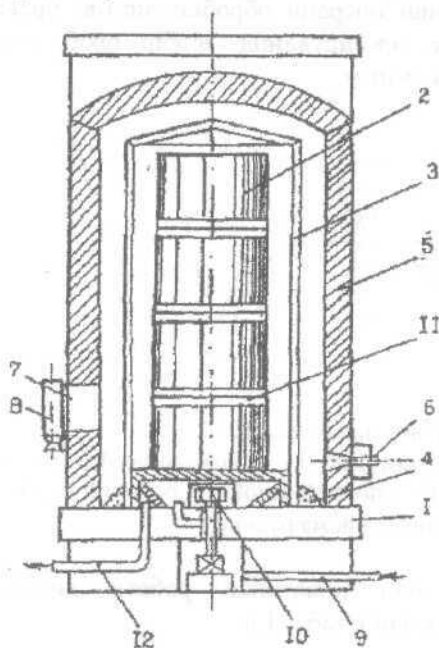


Рис. 4.20. Схема одностопної ковпакової печі для відпалу рулонів: 1-стенд; 2-стопа рулонів; 3-муфель; 4-пісочний затвор; 5-переносний нагрівальний ковпак; 6-пальник; 7-димове вікно; 8-ежектор; 9-труба для подання захисного газу; 10-вентилятор; 11-конвекційна прокладка; 12-труба для виходу захисного газу.

Дресування здійснюють в робочих валках з насиченою поверхнею і отримують штаби з шорсткістю  $R_a \approx 1,5 \dots 1,8 \text{ мкм}$ . Такі листи володіють великими витяжними властивостями при штампуванні, ніж листи з гладкою поверхнею.

При штампуванні виробів із листів з шорсткою поверхнею мастило входить у западини шорсткості, тим самим знижуючи зовнішню тертя і поліпшуючи умови штампування. Крім того, наявність шорсткості на листі забезпечує краще схоплювання покриття з поверхнею виробу. Після дресування рулони відвантажують споживачеві або ріжуть на листи відповідної довжини на агрегаті поперечного різання (АПР) або на вузькі штаби на агрегаті поздовжнього різання (АПЗР). Агрегати поперечного різання забезпечують отримання обрізаних листів довжиною 2...12 м і товщиною 1,2...4 мм. Швидкість руху штаби в АПР 0,5...2,5 м/с. На цих агрегатах, крім різання на мірні довжини, роблять і всі інші операції обробки листів: правку, обрізання бічних кромek, дресування, відбір проб, огляд поверхні, сортування і упакування.

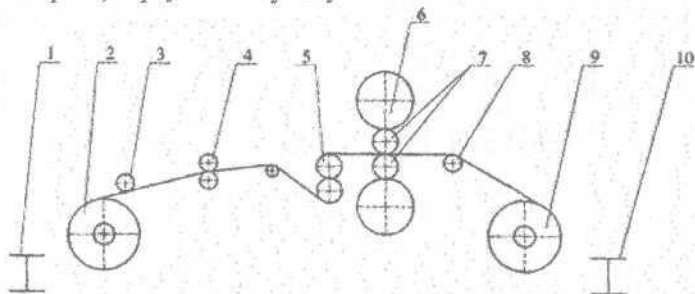


Рис. 4.21. Схема дресировочного стану 1700:

1 – механізм подачі; 2 – розмотувач; 3 – протизломний ролик; 4 – тягучі ролики; 5 – натягач; 6 – опорний валок; 7 – робочий валок; 8 – ролик; 9 – моталка; 10 – механізм з'йому рулону.

Деякі технічні показники роботи листових (штабових) станів представлені в табл. 4.6.

**Таблиця 4.6. Технічні показники станів**

Показники	Стани		
	товстолистові	ШСГП	ШСХП
1	2	3	4
Витрата металу, кг/т	1,18...1,27 (сляби) 1,35...1,87 (зливки)	1,03...1,07	1,07...1,13
Витрата електроенергії, кВт·г/т	40...80	60...70	90...120
Витрата тепла на нагрів 1 т металу, МДж/т	2,51...3,54	2,1	0,96...1,0 (відпалювальні печі)
Витрата води, м <sup>3</sup> /т	2100...2600	7000...8000 (на стані)	-
Витрата валків, кг/т	0,8...2,5	0,8...1,5	0,8...1,25
Витрата захисного газу при відпалі рулонів, м <sup>3</sup> /т	-	-	12
Витрата сірчаної кислоти на травлення, кг/т	-	-	10...15

х) ШСГП – неперервний широкоштабовий стан гарячої прокатки;

ШСХП – неперервний широкоштабовий стан холодної прокатки.

#### **4.14. Основи виробництва жерсті**

Жерсть є основним матеріалом для виготовлення консервної тари і тароупакувальних виробів, широко застосовується в рибній, хімічній, машинобудівній та інших галузях промисловості. Основна доля випадає на виробництво білої жерсті електролітичного лудіння (~ 70%), освоєні економічні види хромованої жерсті, ще зберігається

виробництво і застосування гарячелудженої жерсті. Біла жерсть, а також чорна жерсть, випускаються в листах чи рулонах. Ширина листів, які випускаються 512...1000 мм. В рулонах жерсть випускається шириною до 1250 мм і вагою до 30 т і товщиною до 0,15...0,36 мм. Виробництво жерсті засереджено на меткомбінаті «Запоріжсталь» (Україна), Магнітогорському і Карагандинському меткомбінатах, а також на Лисьвинському металургійному заводі (Росія). Найбільш сучасним є цех жерсті на КарМК продуктивністю ~ 750 тис. т/рік, де уведено в експлуатацію шестиклітьовий стан безперервної прокатки з максимальною швидкістю прокатки до 40 м/с, двоклітьовий прокатно-дресирувальний стан 1400 для виробництва жерсті подвійної прокатки, два агрегата безперервного відпалу і три агрегата електролітичного лудіння загальною потужністю 375 тис. т/рік [36].

Холодну прокатку жерсті здійснюють на безперервних п'яти- і шестиклітьових станах з клітьми кварто, на яких прокатують штаби з мінімальною товщиною 0,12...0,15 мм, з максимальною швидкістю прокатки 30...40 м/с. У цехі жерсті КарМК встановлено шестиклітьовий стан 1400, який забезпечує отримання жерсті шляхом безперервної прокатки гарячекатаних травлених штаб. Схема сучасного технологічного процесу виробництва жерсті подано на рис. 4.22. В цій схемі передбачено суміщення травлення гарячекатаної штаби і подальша її прокатка на шестиклітьовому стані та неперервний відпал холоднокатаної штаби. Процес безконечної прокатки забезпечується шляхом використання стикозварювальної машини перед НТА після обрізання дефектних кінців на ножицях. Після зварювання штаб усувають грат. Стикозварювальна машина забезпечує зварювання штаб профілерозмірів 1,2...6,0x600...1350 мм. Цикл зварювання штаб товщиною до 3 мм із зняттям грату складає не більше 30 с. Натяжний пристрій забезпечує натягування штаби.

Під час зварювання кінців штаб і зупинки розмотувача відбувається прокатка штаби, яка знаходиться у петльовому пристрої, в якому довжина штаби складає 417 м. Петльовий пристрій містить візок з двома роликками і швидкістю переміщення 1,25 м/с при робочому ході 105 м. Перед станом

установлені натяжні пристрої для утворення заднього натягання штаби, а гільйотинні ножиці використовують для розрізання штаби при перевалках і вирізання зварювальних швів. В лінії стана установлено шість ідентичних чотирьохвалкових клітей з опорними валками діаметром 1400 мм і робочими валками діаметром 600 мм.

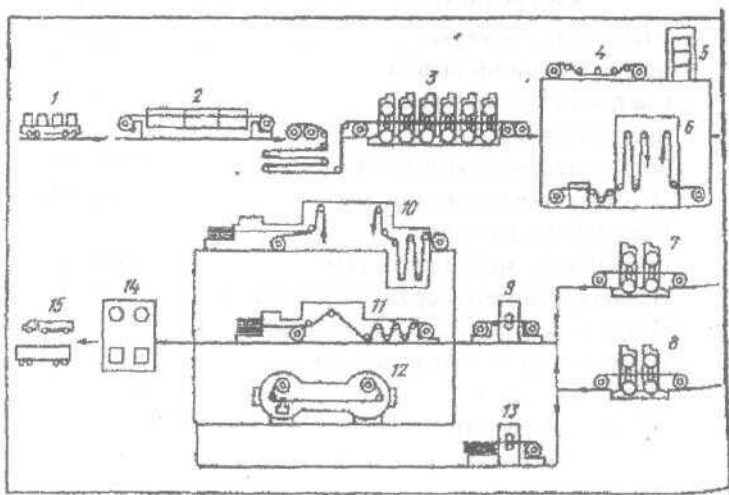


Рис. 4.22. Схема сучасного технологічного процесу виробництва жерсті: 1-рулони; 2-агрегат неперервного травлення штаби; 3-шестиклітьовий стан; 4-агрегат електролітичної очистки поверхні; 5-ковпаківі печі для відпалу; 6-агрегат неперервного відпалу; 7-стан повторної прокатки; 8-дресувальний стан; 9-агрегат для підготовки штаб (обрізання товстих кінців, кромки та ін.); 10-агрегат електролітичного лудіння; 11-агрегат хромування; 12-агрегат алюмування; 13-агрегат для різки на листи; 14-стенд для пакування листів; 15-машина для транспортування продукції.

Кліті стана обладнані електромеханічними і гідравлічними натискними пристроями (ГНП), прес-проводками для випуску заднього кінця з натяганням і запобіганням обковування валків, системою противовигину і додаткового вигину робочих валків, системами автоматичного керування технологічним процесом. Пристрої ГНУ забезпечують необхідну швидкість і точність

регулювання товщини штаби при високих швидкостях прокатки. Нижче приведені основні технічні характеристики стана:

Розміри підката, мм:

товщина .....	1,8...3,0
ширина .....	700...1250
вага рулону, т .....	≤ 30

Швидкість прокатки, .....

при розрізуванні штаби

і заправці в моталку, м/с .....

пропуск шва, м/с .....

випуск заднього кінця, м/с .....

Переріз стойки станіни, мм<sup>2</sup> .....

Потужність двигуна

головного привода кліті, кВт .....

Натягання штаби перед станом, кН .....

Натягання штаби за 6<sup>-ю</sup> кліттю, кН .....

Розміри прокатаних штаб, мм

товщина .....

Зовнішній діаметр .....

мінімальний діаметр .....

Вага рулону, т .....

Точність прокатки, мм при

товщині штаби, мм

0,22...0,25 .....

0,32...0,36 .....

0,4...0,5 .....

0,5...0,6 .....

Опорні валки шестиклітьового стана 1400 установлені в гідростатичних підшипниках рідинного тертя (ПРТ) з упорним вузлом кочення, які зумовлюють постійний міжвалковий зазор при зміні швидкості прокатки. З метою регулювання площинності штаби всі кліті оснащені пристроями противозгину і додаткового вигину робочих валків. Пристрої противовигину усувають хвилястість, а додаткового вигину - коробоватість штаб.



Вихідна частина стана забезпечує неперервний відпал або різання штаб летучими ножицями, змотку моталками і прибирання рулонів від стана. Правильно вибраний режим деформації забезпечує стійкий режим прокатки і отримання якісної жерсті. Раціональні обтиснення розраховують теоретично і потім уточнюють дослідним шляхом в процесі роботи стана з урахуванням особливостей конструкції клітей, систем автоматики, властивостей підкату і інших факторів. Найбільш зручними для практичного використання є критерії оптимізації, які регламентують міру завантаження клітей стана по силі прокатки, крутному моменту, потужності головних приводів. Аналіз режимів обтиснень показує, що рівномірне завантаження клітей по силі прокатки забезпечує рівномірне розподілення відносних деформацій штаби по клітях стана. Проте таке розподілення під час прокатки тонких штаб приводить до перевантаження останньої кліті стана по потужності прокатування в 1,5...2 рази відносно перших клітей. Ця обставина ураховується при розробці режимів деформації штаб.

Величини обтиснень в першій і останній клітях стана найбільш суттєво впливають на стабільність процесу холодної прокатки і якість одержаної листової сталі. В першій кліті з метою усунення поздовжньої різнотовщинності початкового підкату величина відносного обтиснення повинна бути в межах 25...40% в залежності від міри сумарної деформації штаби і потужності установленого головного привода. Указані обтиснення, разом з раціональною шорткістю поверхонь робочих валків першої кліті ( $R_a = 4...5$  мкм), сприяють зменшенню поверхневих дефектів механічного походження (подряпини, потертості, дрібні ум'ятини і т.п.). При виборі величини обтиснення в останній кліті стана треба враховувати, що величина обтиснення суттєво впливає на ефективність роботи системи автоматичного регулювання товщини, форми і напружень натягування по ширині штаби. При цьому збільшення обтиснення сприяє підвищенню ефекту регулювання указаних параметрів. Крім того, застосування значних обтиснень в останній кліті зумовлює більшу товщину штаби

перед кліттю, яка має більший запас пластичності і у меншій мірі піддається розривам під час прокатки. Так, на шестиклітьовому стані 1400 КарМК збільшення товщини штаби перед шостою кліттю від 0,25...0,27 мм до 0,38...0,42 мм під час прокатки жерсті товщиною 0,25 мм зменшує кількість поривів штаб більше, ніж в 2 рази.

На основі виконаних досліджень і особливостей деформації тонкої штаби валками великого діаметра розроблені режими деформації (табл. 4.7), в яких застосовують значні обтиснення в чистій (шостій) клітці -  $\epsilon = 35...60\%$ . Технологічні мастила, які застосовують для холодної прокатки жерсті повинні ефективно знижувати сили зовнішнього тертя і охолоджувати валки, мати високу стабільність властивостей, мінімально забруднювати поверхню металу і легко з неї усуватися, володіти здібністю до регенерації. Мастило не тільки зменшує коефіцієнт тертя, але також знижує знос валків, запобігає налипанню металу на валки і поліпшує якість поверхні штаби. В теперешній час найбільш ефективним мастилом при виробництві жерсті є пальмове масло.

На більшості станів воно подається на штабу перед входом у валки у вигляді механічної водомасляної суміші з концентрацією масла 10...30%. При цьому витрата пальмового масла складає 2...6 кг/т прокату. Система охолодження валків передбачає секційну подачу МОР на окремі ділянки довжини робочих валків з метою виконання оперативного регулювання їх гарячого профілю.

Температура охолоджувальної води звичайно складає 40...50°C, а валків 50...70°C з перепадом температури по довжині бочки  $\sim 10...20^\circ\text{C}$ . Після прокатки на поверхні жерсті залишається частина мастила, яка містить вуглець і залізо. Загальне забруднення штаби після холодної прокатки складає 200...800 мг/м<sup>2</sup>. У зв'язку з цим перед рекристалізацією штаби обезжирюють і очищають методом електролітичної очистки із застосуванням лужного розчину.

Таблиця 4.7. Режими обтиснень під час прокатки жерсті з  $h \leq 0,23$  мм

№№ клітей	$\epsilon$ , %	P, МН	Сила переднього натягування штаби, кН	Струм двигунів головного привода, кА
1	25...30	8...11	250...270	0,2...0,6
2	30...40	8...12	130...150	0,6...1,0
3	30...40	8...11	100...120	0,8...1,2
4	30...40	8...10	70...80	1,2...1,5
5	30...40	8...12	50...60	1,4...1,6
6	35...60	10...13	20...30	1,4...1,8

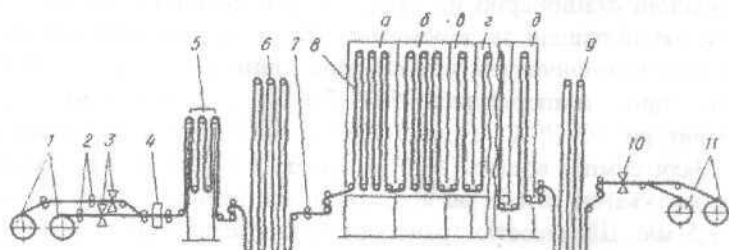


Рис. 4.23. Схема безперервного агрегату відпалу штаби: 1-розмотувач; 2-тягнучі ролики; 3-ножиці; 4-зварювальний агрегат; 5-ванни електролітичного очищення штаби; 6; 9-петльонакоплювачі; 7-дисккові ножиці; 8-під для відпалу (камери: а-витримки, б-сповільненого охолодження; в-прискороеного охолодження, г-остаточного охолодження); 10-ножиці; 11-моталка.

Схема агрегату безперервного відпалу (АВВ) жерсті представлена на рис. 4.23. Продуктивність АВВ жерсті досягає 60 т/г. Сучасний АВВ містить головну, середню (пічну) і хвостову частини. Обладнання головної частини забезпечує приймання, розмотування рулонів, обрізання дефектних кінців штаб, зварювання початку наступної і кінця попередньої штаб у накладку, очищення і обезжирювання поверхні штаби, утворення запасу штаби для забезпечення безперервного процесу.

Після зварювання кінців безкінечна штаба за допомогою тягнучих роликів, подається в установку електролітичного очищення, яка має дві ванни обезжирювання вертикального типу. Обезжирюючий розчин має 20...40 г/л NaOH і 20...40 г/л  $\text{Na}_2\text{PO}_4$  (тринатрій фосфат) і температуру 70...90°C. Після хімічного обезжирювання штаба піддається обробці з обох сторін капроновими щітками, які обертаються, притиснуті до штаби з зусиллям  $\sim 600$  Н. Після щітко-миючих машин в першій ванні, штаба подається у блок ванн електролітичного обезжирювання для усунення залишених жирових забруднень за допомогою лужного електроліту ( $t = 70...90^\circ\text{C}$ ), а потім в другу ванну гарячої промивки штаби і в сушильну камеру для обробки поверхні повітрям з  $t \approx 100^\circ\text{C}$ . Просушена штаба подається в накопичувач вертикального типу. Нижні ролики накопичувача установлені стаціонарно на рамі, а верхні ролики укріплені на візках, які підвішені за допомогою тросів на противовантажах. За петльонакопичувачем установлена пічна секція для відпалу жерсті при температурах 580...730°C і охолодження до температури 60...70°C. Відпал жерсті здійснюють в захисній атмосфері суміші водню (4...6%) і азоту (94...96%). Швидкість транспортування штаби по агрегату може змінюватися у межах 1,7...7,5 м/с. Швидкостю транспортування штаби впливають на механічні властивості штаби.

Д्रेसирування жерсті здійснюють на одноклітьових і двоклітьових станах. На двоклітьових станах робочі валки в першій кліті мають діаметр 400...420 мм, у другій кліті – 570...600 мм, максимальну швидкість 40 м/с і допустиме зусилля на валки 20 МН. Оскільки дресирування жерсті здійснюється безпосередньо перед лудінням, застосування технологічного мастила недопустиме. З метою підвищення якості поверхні штаби приводними є опорні валки. Це виключає ковзання робочих валків по штабі та утворення на її поверхні подряпин. Сумарна величина обтиску у двох клітях складає  $\varepsilon = 1...6\%$  і при цьому в першій кліті обтиск  $\varepsilon_1 = (0,7...0,85)\varepsilon_{\Sigma}$ . В процесі дресирування жерсті зростають показники механічних властивостей (твердість і міцність) і декілька знижуються показники штамповки.

Після дресування поверхню штаби жерсті покривають оловом, хромом, алюмінієм, лаком. В основному виготовляють жерсті з олов'яним покриттям. Відомо два способи лудіння: гаряче і електролітичне (АЕЛ). При гарячому лудінні на кожному поверхню листа (штаби) наноситься шар олова товщиною 1,5...3 мкм при витраті олова 15...20 кг/т. На нових заводах застосовують безконечне електролітичне лудіння, при якому товщина шару олова складає 1,0...1,5 мкм при витраті олова 5...7 кг/т. Проте, електролітична луджена жерсть по корозійній стійкості поступається жерсті гарячого лудіння. Тому білу жерсть, яку отримали на АЕЛ, часто покривають лаком.

Дефекти поверхні гарячекатаних штаб переходять на поверхню холоднокатаних штаб (півка, залишки окалини, надриви і т.п.). Однак в процесі холодної прокатки з'являються нові дефекти [17, 22, 24, 31, 38, 51]. Дефект "рубці" виникає при підвищених місцевих обтисках внаслідок зміщення штаби в валках від втрати стійкості. Листи з таким дефектом переводять в брак.

Дефект "зломи" утворюється в процесі дресування штаби після відпалу. Причиною їх появи є злипання – зварювання витків штаби в рулоні при відпалі із-за високих температур і контактних напружень, малої шорсткості поверхні холоднокатаної штаби. Наявність місцевих викривлень поперечного профілю і форми штаби також веде до появи злипання – зварювання витків. В процесі розмотування рулону в місцях злипання відбувається нерівномірна пластична деформація, сліди від якої і створюють дефект "злом". Для запобігання утворення "зломів" штаба повинна мати високу площинність, а напруження натягування штаби при змотуванні її в рулон на стані холодної прокатки не повинно перевищувати 40 Н/мм<sup>2</sup>; робочі валки чистової кліті стана необхідно виготовляти з шорсткістю в межах 4-6 мкм R<sub>a</sub> [51].

Дефект "рябизна" представляє собою світлі штрихи, витягнуті вздовж прокатки від розкатування дрібних поглиблень, від витравленої удавленої окалини і має груповий характер. Дефект "плями забруднень" має вигляд чорних і темних плям, смуг, розводів на відпаленому холоднокатаному металі. Частіше всього це плями сажі, емульсії і масла. Плями

забруднень утворюються за наявності на поверхні штаби після прокатки значної кількості емульсії; високої концентрації; використання прокатної емульсії з низькою миючої здібністю. Для запобігання утворення дефектів треба суворо дотримуватися вимог технологічної інструкції по раціональному виробництву жерсті (штаб, листів).

#### 4.15. Геометричні параметри і матеріал валків для прокатки штаб

Валки листових (штабових станів) виконують основне завдання пластичної деформації металу і тому їх якість визначає не тільки продуктивність прокатного стану, але якість поверхні і геометричного профілю штаби (листа) [30,37,41,52-58].

У багатовалковій кліті валки, що контактують з металом, називаються робочими. Опорні валки сприймають навантаження від металу через робочі валки. Робочі валки мають бочку, шийки і хвостовики. З'єднання робочих валків з приводом здійснюється за допомогою універсальних шпінделів або шпінделів і зубчатих муфт.

Діаметр робочих валків листових станів визначають з умов захвату (чорнові кліті) і достатньої зносостійкості (передчистові і чистові кліті) (табл.4.8). Діаметр робочих валків станів гарячої прокатки 600-1200 мм, а холодної – 200-600 мм, а довжина бочки валків визначається шириною штаби, міцністю і прогином, що допускається. Діаметр опорних валків обумовлений необхідною їх міцністю і прогином що допускається. Максимальні діаметри робочих і опорних валків має листовий стан із довжиною бочки  $L=5500$  мм, на якому робочі валки  $D_p=1200$  мм, а опорні  $D_{оп}=2400$  мм (нові валки).

На станах гарячої прокатки сталіні опорні валки цілісноковані, а на станах холодної прокатки складені (рис.4.24).

Товщина з бандажа із сталі рівна  $z/R = 0,35 - 0,25$  ( $z$  - товщина бандажа;  $R$  - радіус опорного валка). Більше значення

$z/R$  відповідає валку з  $L_s = 1200$  мм, а менше -  $L_s = 5000$  мм.

Бандаж на вісь встановлюють з натягом  $\delta = 0,6-1,55$  мм ( $\delta/d=0,0008-0,00137$ , де  $\delta$  - величина натягу;  $d$  - діаметр посадочного діаметра опорного валка).

Робочі валки виконують цілісноковані, а для невеликих станів зі внутрішньою порожниною для поліпшення охолодження.

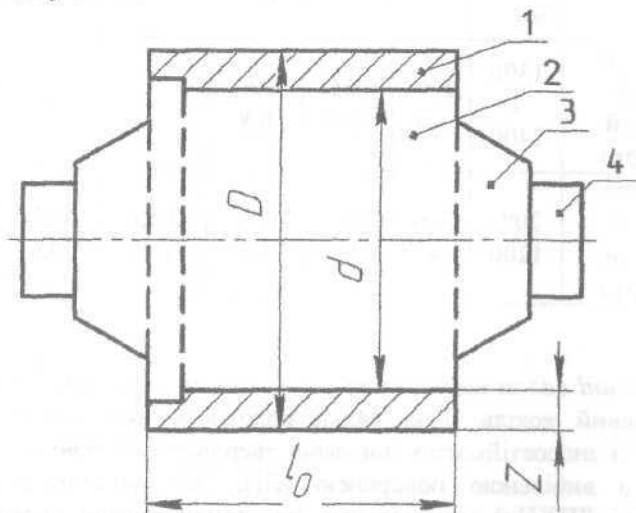


Рис. 4.24. Складений опорний валок стана холодної прокатки штаб: 1 – бандаж; 2 – вісь; 3 – шийка; 4 – хвостовик

Валки листових станів повинні задовольняти наступним основним вимогам:

- всі елементи валка повинні мати високу міцність і мінімальний вигин бочки, що допускається;
- поверхневий робочий шар бочки валка повинен мати високі твердість і зносостійкість;
- поверхневий шар бочки валка гарячої прокатки повинен бути термостійким, тобто володіти протигідією високій температурі металу і різкій зміні температури валка під час паузи;

поверхневий шар бочки валків при холодній прокатки повинен витримувати без руйнування великі контактні напруження.

Таблиця 4.8. Основні співвідношення розмірів елементів валків листових станів

Валки	Бочка		Шийка		Хвостовик	
	D, мм	L/D	$d_{пр}/D$	$l_{пр}/D$	$d_1/D$	$l_1/D$
Опорні валки клітей кварто	1300 - 2400	1,8- 3,5	0,55- 0,75	0,6- 0,8	-	-
Робочі валки клітей кварто	200- 1200	2,5- 4	0,6- 0,7	0,8- 1,3	0,55- 0,6	0,5- 0,6

*Чавунні валки* виготовляють шляхом лиття рідкого чавуну в металевий кокіль. Такі валки володіють високою якістю поверхні і зносостійкістю (високою твердістю). Робочі валки з чавуну з вибіленою поверхнею (ЛП, ЛЩ, никельмагнієві, двошарові ЛПХНд) застосовують на станах гарячої прокатки. Валки з меншою твердістю в чорнових клітках (58-68 HSD), валки з більшою твердістю (62-85 HSD) в чистових клітках.

Легування чавуну хромом, нікелем і молібденом підвищує його міцність, а також твердість вибіленого шару. Модифікування чавунних валків магнієм збільшує їх міцність і пластичність. У модифікованому чавуні включення графіту мають кулясту форму і ізольовані один від одного, тоді як в звичайному чавуні вони розташовуються у вигляді пластин і лусок, часто незв'язаних між собою, що різко знижує його механічні властивості. Міцність чавунних валків істотно менша, ніж сталевих валків.

*Сталеві ковани валки* на ШСГП застосовують як опорні у всіх клітках стана і як робочі в перших клітках чорнової групи.



На ШСГП опорні і робочі валки цілісноковані і виготовлені із сталі марок 9Х2, 9ХФ і т.п. Поверхню опорних валків піддають гарту до твердості 45-60 НSD, що підвищує їх зносостійкість і опір проти викришivanja. Сталеві робочі валки забезпечують захват розкату з кутом 19-20 град.

Недоліком чавунних валків, які встановлені в клітях чистої групи є їх інтенсивний і нерівномірний знос по довжині бочки валка. Чавунні валки замінюють на ефективніші двошарові, в яких вісь виготовляють з кулястого графіту або із сталі, а зовнішній (робочий) з високохромистого чавуну. Такі валки мають стійкість в 1,5-2 рази вище, ніж звичайні валки ЛПХНд, які застосовують в даний час. Окрім цього, в чистовій групі клітей застосовують робочі валки з високоякісної швидкорізальної сталі (марка HVS85) [57,58].

Для станів холодної прокатки, як і для інших станів, основними параметрами, є діаметр і довжина бочки. Діаметр валка вибирають за наслідками розрахунків на міцність і величин контактних напружень. Довжина бочки обумовлена шириною штаби і необхідною жорсткістю проти вигину. Звичайно максимальна ширина штаби, повинна бути рівна  $B=(0,85-0,9)L$ . Для прокатки стрічки застосовують валки із довжиною бочки  $L=200-300$  мм, для вузьких штаб  $L \leq 800$  мм, для штаб  $L=1200-2500$  мм. Діаметр бочки робочих валків для холодної прокатки штаб товщиною 0,4-2,0 мм складає 500-600 мм.

Робочі валки мають бочку, шийку і хвостовик для приводу і завалки. Розміри елементів валків для клітей кварто дані табл. 4.8. Опорні валки виготовляють складеними з віссю і бандажем (мал. 4.23), що дозволяє економити дорогі марки стали, а вісь використовувати неодноразово. Зношений бандаж (після доставки опорного валка на машинобудівний завод) знімають з осі часто механічним способом – шляхом різання (нанесення концентратів напружень) і подальшого руйнування піропатронами в спеціальних ямах.

Робочі валки станів холодної прокатки працюють в чотирирядних підшипниках кочення з конічними роликками, а опорні валки – в підшипниках рідинного тертя (ПРТ).

Для виготовлення робочих валків холодної прокатки застосовують високоякісні сталі, що містять мінімальну кількість домішок (9X, 9X2, 9XF, 9X2MF, 9X2B, 9X2CBF, 60X2CMF). З приведених марок сталь 60X2CMF є доэвтэктоидной, а інші – заэвтэктоидними. Гарт і відпустка валків забезпечують отримання високої твердості на глибину 15-20 мм на радіус (90-102HSD). Сталі марок 9X, 9X2 і 9XF, рекомендують застосовувати для виготовлення робочих валків діаметром менше 400 мм. Проте ці сталі застосовують і для виготовлення валків з  $D > 400$  мм.

Хромомолібденованадієва сталь 9X2MF завдяки підвищеній кількості хрому і наявності молібдену і ванадію володіє значною прогартованістю і в'язкістю, чим стали 9X, 9X2, 9XF. Сталь марки 9X2MF володіє більшою витривалістю і опором викришванню. Практично такими ж технологічними і експлуатаційними властивостями, що і сталь марки 9X2MF, володіє хромовольфрамова сталь 9X2B. Вищі експлуатаційні властивості мають валки з кремніє-вовольфромованадієвої сталі марок 9X2CBF і 9XCBF. Кремній підвищує теплостійкість сталі і тому в таких валках можна прокатувати штаби з вищими швидкостями. Вказані сталі рекомендують застосовувати для виготовлення валків з діаметром  $D > 400$  мм.

Сталеві робочі валки станів холодної прокатки після виготовлення повинні вилежуватися 4-6 місяців для релаксації внутрішніх напружень і лише після цього встановити їх в кліть. Термін вылеживання можна скоротити шляхом низької відпустки нових валків в індукторі при температурі  $t \approx 250^{\circ}\text{C}$  на протязі 1,5-2-х годин.

Шліфування робочих валків після зносу необхідно виконувати після їх повного охолодження до температури навколишнього середовища. Технологія механічної обробки валків дана в роботі [54].

До і після шліфування валків профіль їх створюючих вимірюють пасометром (профілемір) (рис. 4.25) з індикатором. Точність вимірювання 0,01 мм (іноді 0,001 мм).

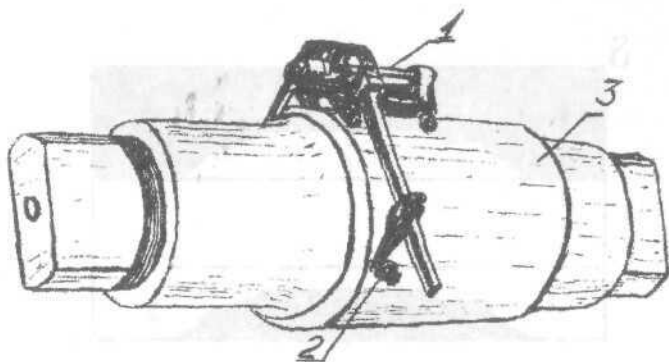


Рис. 4.25. Пасометр: 1 – візок; 2 – індикатор; 3 – бочка валка

В процесі прокатки робочі і опорні валки одержують знос поверхонь бочок в межах 0,05-0,4 мм. В деяких випадках, при контакті з насиченим робочим валком, опорний валок стана холодної прокатки одержують максимальний знос у середині бочки більше 1,5 мм. Форма створюючої зношеного валка обумовлена величиною прогинів валків, станом їх поверхонь, параметрами профіля бочок твірних, шириною штаби, формою епюри розподілу температури по довжині валків.

Найбільш характерні профілі зносу ( $\delta$ ) робочих і опорних валків показані на рис. 4.26. У першому випадку показано характер зносу циліндричного (опуклого) опорного валка при спільній роботі з опуклим робочим валком. Такий же знос має місце на робочих валках у контакті зі штабою. Переважний знос у середині довжини бочки валків обумовлено дією великих контактних напружень (для опорних валків) і великими змінними напруженнями вигину (для робочих валків).

Другий випадок характерний для циліндричних опорних валків при спільній їх роботі з циліндричними або увігнутими робочими валками.

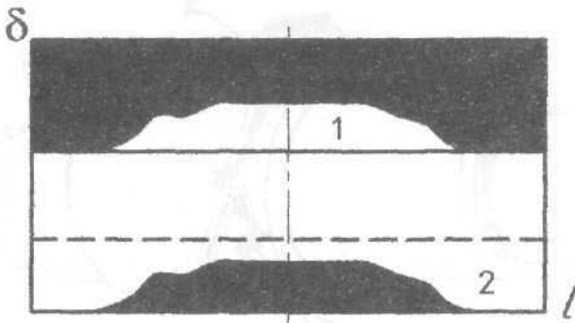


Рис. 4.26. Форми твірних валків після зносу в процесі роботи: 1 – з початковим опуклим профілем; 2 – з початковим циліндричним профілем (1,2 – області зносу валків).

#### 4.16. Типи профілювань бочок валків

Основне завдання профілювання валків листових станів – отримання рівних і точних штаб. Це завдання може бути в значній мірі вирішено застосуванням раціональної початкової форми бочок твірних валків, для конкретного прокатного стану і профілю штаби. Важливе значення при виборі початкового профілювання є також досягнення максимальної експлуатаційної стійкості валків, що прямо впливає на якість поперечного профілю листів. Основними геометричними дефектами штаб (листів) є висока поперечна різнотовщинність, стоншення кромки на ширині 30 – 40 мм і неплосцинність (коробоватість, хвилястість).

Поперечна різнотолщинність штаби (більша товщина у середині ширини) формується на станах гарячої прокатки і вважається нормальною якщо вона складає  $\delta_n = 0,03 - 0,05$  мм. Проте часто величина  $\delta_n$  перевищує вказані значення унаслідок вироблення опорних валків і прокатки широких штаб після вузьких без перевалки робочих валків. Під поперечною різнотовщинністю листа (штаби) мають на увазі відмінність товщини штаби між серединою ( $h_c$ ) і кромкою штаби ( $h_{кр}$ ) на відстані 40 мм від краю ширини (рис. 4.27):

$$\delta_n = h_c - h_{кр}; \quad h_{кр} = 0,5(h_{II} + h_g).$$

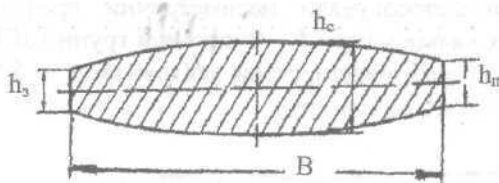


Рис. 4.27. Опуклий поперечний профіль штаби

Найбільш поширені типи профілювання валків ШСХП і ШСГП представлені на рис. 4.28. Обов'язковим в цих профілях є застосування кінцевих скосів (врезів) на опорних валках. Довжина скосів (врезів)  $z = 100 - 300$  мм, глибина скосу  $0,4 - 0,6$  мм на діаметр, а вреза  $1,5 - 3$  мм на діаметр. Наявність скосів (врезів) опорних валків виключає затискання краєвих ділянок бочок робочих валків і запобігає утворенню хвилястості країв штаби. Найбільш доцільним є виконання опорних валків з короткими врезами ( $c_1 = 80 - 100$  мм) і довгими скосами ( $150 - 200$  мм) з опуклістю  $f_{оп} = 0,2 - 0,8$  мм.

Робочі валки виконують циліндричними (а,б), з випуклим профілем бочки (в) або з увігнутим профілем. Величина опуклості на діаметр складає  $f = 0,05 - 0,5$  мм. На ШСГП один з робочих валків виготовляють (шліфують) з увігнутим профілем ( $f_p = 0,05 - 0,2$ ), а перед установкою в кліть середину бочки підігрівають в індукторах до отримання необхідного (опуклого) профілю [30].

Симетричними профілюваннями валків (рис. 4.28) можна регулювати міжвалковий зазор при симетричному і рівномірному по ширині зносі валків. У разі нерівномірного зносу бочок валків симетричні профілювання валків не можуть забезпечити отримання якісного поперечного профілю штаби. У цих умовах прокатки профіль штаби одержує клиновидний профіль поперечного перетину. Ця клиновидність (до  $0,05 - 0,08$  мм) може з'явитися і в результаті різної температури країв штаби. З метою усунення клиновидності на меткомбінаті

«Запоріжсталь» для усунення клиновидності штаби по ширині виготовлені скоси завдовжки  $C = 500$  мм і завглибшки  $\delta = 0,3$  мм на діаметр). застосовували несиметричні профілі бочок верхніх опорних валків клітей 5 – 9 чистової групи ШСГП 1680 ( з боку приводу виготовлені скоси завдовжки  $z = 500$  мм і завглибшки  $\delta = 0,3$  мм на діаметр).

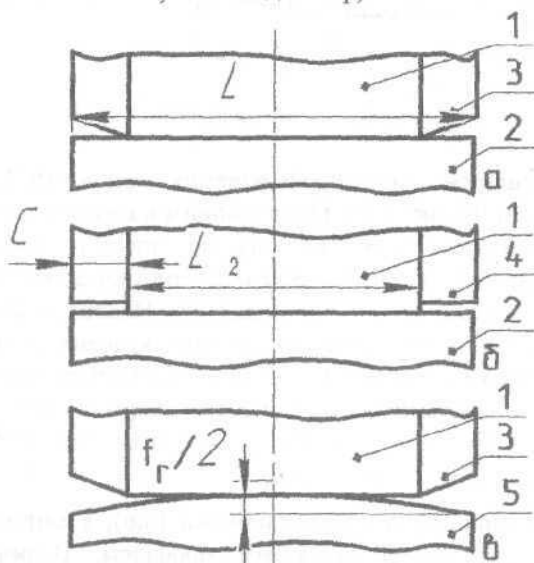


Рис.4.28. Типи початкових профілів валків (а – в): 1 – бочка опорного валка; 2 – робочий валок з циліндричним профілем створюючої; 3 – краєвий скіс опорного валка; 4 – краєвий врез опорного валка; 5 – робочий валок з опуклим профілем створюючої бочки

Симетричне профілювання робочих валків не може компенсувати нерівномірність їх зносу при тривалому прокатуванні штаби з  $V \approx \text{const}$ . Таке вироблення валків погіршує якість поперечного профілю штаби, викликає необхідність частой їх заміни на нові.

Зменшення нерівномірності зносу валків досягається застосуванням, так званої, безпрограмної прокатки, в якій передбачається регулярна (після прокатки чергової штаби)

зміна положення максимального зносу шляхом осьового зсуву робочих валків відносно один одного в протилежні сторони на 75 – 100 мм. Такий процес ліквідує на ваках місцеві вироблення, а на штабі місцеві потовщення, збільшує термін їх служби в кліті (Японія).

З метою істотного підвищення ефективності регулювання поперечного профілю штаби японськими фірмами «Хитаچی сейсакусе» і «Син ниппон сейтецу» розроблена конструкція шестивалкової кліті (рис. 4.29). Особливістю конструкції кліті є те, що між робочими 2 і опорними 4 валками розміщені проміжні 3 валки, які можуть переміщатися в осьовому напрямі відповідно до різних умов прокатки. Проміжні валки можуть зміщуватися в протилежних напрямках щодо штаби 1 і встановлюватися по кромці в будь-якому положенні залежно від ширини штаби. При цьому досягається можливість регулювати відповідний прогин робочого валка, зменшувати нерівномірність розподілу міжвалкового тиску і тиску під штабою ( $q_y$  і  $p_y$ ) і підвищувати площинність штаби. При регулюванні профілю штаби пристроями протипрогину 5 робочих валків ефект регулювання дещо знижується із-за контакту краю бочки одного з робочих валків з проміжним валком з кожної сторони кліті. Це значною мірою компенсується вільним відгином краю бочки іншого робочого валка, позбавленого опори на проміжний валок. У цих клітях діаметр робочих валків на ~ 30% менше, ніж в клітях кварту, а хід проміжних валків в осьовому напрямі становить ~300 мм. В процесі експлуатації цих клітей був виявлений ряд недоліків, які обмежують їх використання. До основних недоліків відносять [49, 65]:

- Ефективність регулювання зменшується при збільшенні ширини штаби, а при прокатуванні максимальної ширини стає аналогічною чотиривалковий, але з модулем жорсткості на 30% менше;
- Несиметричний по ширині знос всіх трьох пар валків, збільшений знос робочого валка меншого діаметру. Це скорочує міжперевалочний період роботи валків.

У ФРН запропоновано профілі робочих валків S – образної форми (валки SVC), який забезпечує управління профілем

штаби в процесі прокатки (рис. 4.30). Два валки, які відшліфовані у формі «пляшки» в кліті кварто примусово переміщують в осьовому напрямі протилежно один одному. При цьому досягається отримання прямокутної, опуклої або увігнутої форми межвалкового зазора в процесі експлуатації валків (поперечного перетину штаби). Різниця діаметру валка SVC по його довжині залежно від сортаменту штаб знаходиться в межах 0,3 – 0,8 мм. За даними випробувань S – образне профілювання валків забезпечує зниження різновтовщинисті штаби і підвищення експлуатаційної стійкості валків. Проте S – образне профілювання робочих валків викликає нерівномірний знос опорних валків, що погіршує умови регулювання товщини штаби по її ширині, а перенесення приводу на опорні валки підвищує бюджетні витрати на виготовлення і будівництво стану SVC. Проте систему валків SVC використовують на багатьох станах прокатки штаб (табл.3.9).

Підвищення точності штаб забезпечується також використанням несиметричних профілюровок валків із зсувом вершин опуклостей двох суміжних валків (ПСВО) на відстань  $S_0 = (0,2 - 0,3)L$  щодо один одного. Межвалковий зазор, форма якого змінюється при осьовому переміщенні валків, дає можливість регулювати поперечний профіль штаби і її площинність [41].

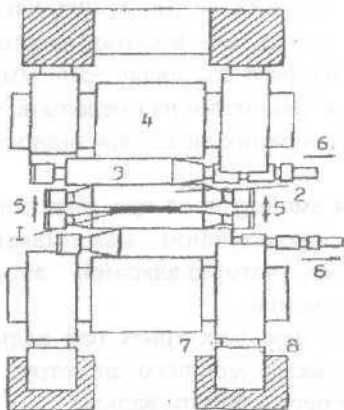


Рис. 4.29. Схема шестивалкової кліті: 1 – штаба; 2 – робочий валок; 3 – проміжний валок; 4 – опорний валок; 5 – напрям дії вигину робочих валків; 6 – напрям осьового переміщення; 7 – месдоза; 8 – гідроциліндр нажимного пристрою.



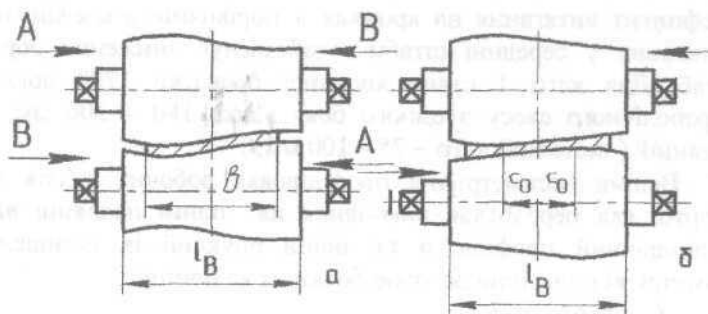


Рис. 4.30. Профілі валків типу CVC (а) і із зміщеними опуклостями (б) А, В – напрям зсуву валків.

В порівнянні з валками типу CVC, дане профілювання дозволяє регулювати розміри межвалкового зазора при меншому осьовому зсуві валків і простіше у виготовленні.

Більша різноманітність профілів запропонована для валків станів холодної прокатки штаб. При холодному прокатуванні деформація штаби не повинна змінюватися відносно поперечної різнотовщинності гарячекатаної штаби, тобто

$$\frac{H_c}{H_k} = \frac{h_c}{h_k},$$

де  $H_c$ ,  $H_k$ ,  $h_c$ ,  $h_k$  – товщина штаба відповідно у середині (с) і на кромці (к) для гарячекатаної ( $H_i$ ) і холоднокатаної ( $h_i$ ) штаб.

Порушення цієї умови приводить до появи неплоскостності (непланшетності) штаби.

Основне завдання холодної прокатки, разом із зменшенням товщини штаби – забезпечити її високу площинність (відсутність хвилястості і жолобчатості), при постійній її відносній поперечній різнотовщинності.

Профілі опорних валків, які запропоновані в роботі [41], виконані по параболі вищого порядку ( $m \geq 4-6$ ) і забезпечують більш рівномірний розподіл міжвалкового тиску у клітях де відсутня система CVC. З метою зниження розтягуючих напружень на кромках штаб довжину скосів (врезів) опорних валків зменшують від першої кліті стана до наступних. Таке профілювання дозволяє збільшувати по ходу прокатки

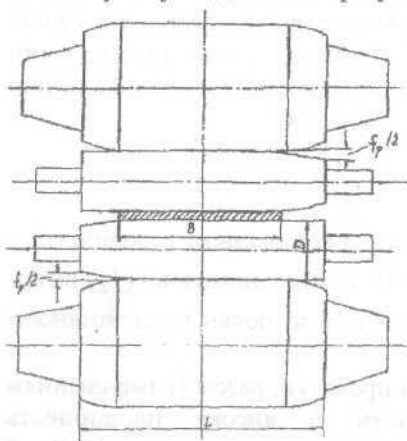
коефіцієнт витягання на кромках в порівнянні з коефіцієнтом витягання у середині штаби і забезпечує зниження обривів штаб. Для кліті 1 стана холодної прокатки 1700 довжина параболічного скосу з одного боку валка 180 – 300 мм, а в останній (чистовий) кліті – 75 – 100 мм.

Відома несиметрична профілювка робочих валків кліті кварто, яка передбачає виконання на одній половині валка циліндричний профіль, а на іншій опуклий із зменшенням діаметру від середини до краю бочки на величину

$$f_p = 0,05 - 0,4 \text{ мм}$$

Причому верхні і нижні робочі валки мають протилежні опуклі і циліндричні ділянки [41, 72] (рис. 4.31).

Несиметричне розташування опуклостей верхнього і нижнього валків в кліті і правильно встановлені значення  $f_p$  при осьовому зсуві дозволяє регулювати межвалковий зазор на задану величину. Крім того,



таке профілювання робочих валків не має опуклих вершин, що зменшує нерівномірність зносу опорних валків і забезпечує самоцентрування валків і штаби по осі прокатки, сприяє зниженню стонщування кромки.

Рис. 4.31. Клітть кварто з несиметричним профілюванням робочих валків.

На 20-ті валкових станах в даний час використовують декілька типів профілювань валків. Причому, профілюють в основному перші проміжні валки з кінцевими скосами, які оснащені механізмами осьового переміщення. Робочі валки мають циліндричний профіль або невелику (до 0,4 мм) опуклість. На ряді станів застосовують симетричні профілі перших проміжних валків. При цих профілюваннях відсутні

осьові навантаження на підшипники робочих валків і вони також забезпечують отримання якісних штаб з неплощинністю 2 – 3 мм. Проте при таких профілях довжина циліндричної частини  $L_2$  валка повинна кожного разу змінюватися при зміні ширини штаби або марки стали металу [41].

#### 4.17. Прогини валків чотирьохвалкової кліті

У чотирьохвалковій кліті штабового (листового) стана прогин робочого валка обумовлений ступеню нерівномірності розподілу міжвалкового ( $q_y$ ) і погонного ( $p_y$ ) по ширині штаби тиску, а прогин опорного валка визначається силою прокатки і його жорсткістю. Визначивши прогини валкового комплексу можна розрахувати величину необхідної початкової опуклості (угнутості) робочого валка, для отримання штаби (листа) з поперечної різновтовщинністю, що допускається.

Нерівномірності міжвалкових і погонного тиску оцінюється коефіцієнтами  $n$  і  $n_1$ :

$$n = q_1/q_0; \quad n_1 = p_1/p_0. \quad (4.1)$$

де  $q_0$  і  $q_1$  – міжвалкові тиски по осі і на кромці контакту;  $p_0$  і  $p_1$  – погонний тиск по осі і на кромці контакту штаби з валком.

На підставі досліджень В. П. Полухина [76] коефіцієнти  $n$  і  $n_1$  можуть бути визначені з формул:

$$n = \left[ 0,86 + 0,97 \frac{B}{L_2} \left( 2,44 \frac{B}{L_2} - 1 \right) - 5,9 \frac{D_1}{D_2} \left( 1 - 1,56 \frac{D_1}{D_2} \right) \right] \times \\ \times \left[ 0,5 + 0,5 \left( 1 - \frac{10^3 f_{\Sigma}}{L_2} \right)^2 \right], \quad (4.2)$$

$$n_1 = 0,87 + 3,15 \cdot \left( \frac{B}{L} - 0,39 \right)^4, \quad (4.3)$$

де  $D_1$  і  $D_2$  – діаметри робочого і опорного валків;  $B$  – ширина штаби;  $L_2$  – довжина активній частині створюючої опорного валка (без скосів, врезів);  $f_{\Sigma}$  – сумарна опуклість робочого і опорного валків.

Коефіцієнт  $n_1$  за даними [77,78] менше одиниці ( $n_1 < 1$ ), но дослідження виконано в двохвалковій кліті. При прокатуванні в чотирьохвалковій кліті коефіцієнт  $n_1$  не визначено [41] ширина штаби через коефіцієнт  $n_1$  суттєво впливає на прогин валків і величину опуклості робочого валка. При  $n_1 < 1$  прогин валків більш ніж при  $n_1 > 1$ .

При прокатуванні вузьких штаб ( $B/L < 0,6$ ) коефіцієнти  $n < 1$ ,  $n_1 < 1$  і прогин валків максимальний. В цьому випадку міжвалковий  $q_0$  і погонний  $p_0$  тиски максимальні по осі валків (рис. 4.32). Для штаб шириною  $B/L = 0,75 - 0,8$  величини  $q_y$  і  $p_y$  розподілені по довжині контакту практично рівномірно і коефіцієнти  $n = n_1 \approx 1$ , а власний прогин робочих валків може бути відсутнім. У загальному випадку розподіл тисків по довжині контакту можуть бути визначені по формулах [22, 41].

$$q_y = \frac{P(1+m)}{L_2(m+n)} \left[ 1 + (n-1) \left( \frac{2y}{L_2} \right)^m \right]; \quad (4.4)$$

$$p_y = \frac{P(1+m_1)}{B(m_1+n_1)} \left[ 1 + (n_1-1) \left( \frac{2y}{B} \right)^{m_1} \right],$$

де  $m$  і  $m_1$  – показники ступеня кривизни епюр міжвалкового тиску і тиску штаби на валки;  $y$  – координата довжини контакту. Як впливає з формул, показники ступеня кривизни епюр тиску роблять певний вплив на характер розподілу їх по довжині контакту. Проте на підставі практичних даних можна приймати  $m = m_1 = 2$ . Тоді:

$$q_y = \frac{3P}{(2+n) \cdot L_2} \left[ 1 + (n-1) \left( \frac{2y}{L_2} \right)^2 \right],$$

$$p_y = \frac{3P}{B(2+n_1)} \left[ 1 + (n_1-1) \left( \frac{2y}{B} \right)^2 \right].$$

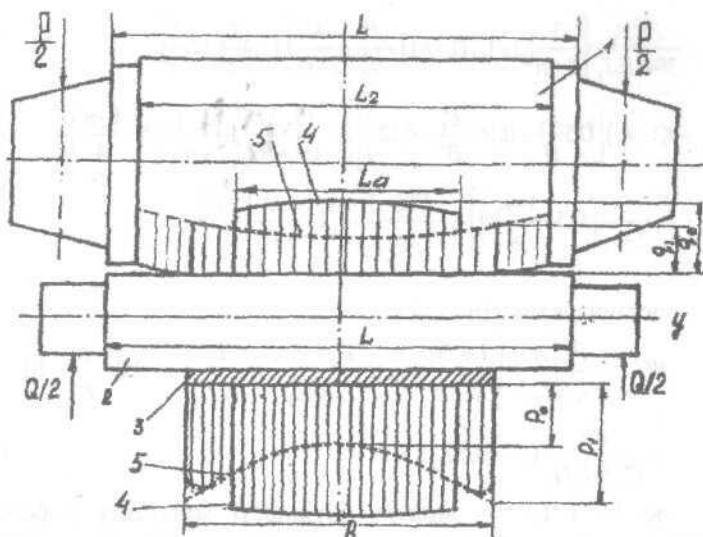


Рис. 4.32. Нерівномірний розподіл тиску  $q(y)$  між новими циліндричними опорними і робочими валками і робочим валком і штабою  $p(y)$ : 1 – опорний валок; 2 – робочий валок; 3 – штаба; 4 – ешора  $p(y)$  і  $q(y)$  при прокатуванні вузьких штаб; 5 – теж при прокатуванні широких штаб

Задавши умови прокатки, розміри валків і визначивши силу прокатки по відомих формулах між  $q_y$  ( $p_y$ ) і прогинами балки, лежачої на пружній основі, визначають прогини робочого ( $W_1$ ) і опорного ( $W_2$ ) валків.

Під дією тиску  $p_y$  відбувається власний вигин робочого валка. Опорний валок чинить опір цьому вигину і на межвалковом контакті виникає реакція у вигляді тиску  $q_y$ . Сума тисків  $q_y$  в свою чергу викликає вигин опорного валка. Таким чином, розміри зазора між робочими валками буде в першу чергу визначатися сумою прогинів робочих і опорних валків.

Теоретичним шляхом прогини робочого і опорного валків розраховують по формулах [22, 41]:

Прогин робочого валка ( $m = 2$ ) на довжині  $L_2$

$$\begin{aligned}
 W_1 = & \frac{PL_2^3 A_1}{384 E_1 J_1} \left\{ \frac{3}{2+n} [3-1,7(1-n)] - \frac{B^3}{L_2^3} \cdot \frac{3}{2+n_1} \left[ 1-4 \frac{L_2}{B} + 6 \frac{L_2^2}{B^2} - \right. \right. \\
 & \left. \left. -8(1-n_1) \left( 0,5 \frac{L_2^4}{B^4} - 0,167 \frac{L_2^3}{B^3} - 0,12 \right) \right] \right\} + \frac{PL_2 A_1 k}{4\pi R_1^2 G_1} \left[ \frac{3}{2+n} \left( 0,5 - \frac{1-n}{4} \right) - \right. \\
 & \left. - \frac{B}{L_2} \frac{3}{2+n_1} \left( 0,5 - \frac{1-n_1}{4} \right) \right] + \frac{QL_2^3}{32 E_1 J_1} \left[ \frac{a}{L_2} \left( 1 - \frac{2a^2}{3L_2^2} \right) - \frac{1}{3} \right]; \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

опорного валка ( $m_1 = 2$ )

$$\begin{aligned}
 W_2 = & \frac{PL_2^3 A_1}{29,5 E_2 J_2} \left[ \frac{1+2n}{2+n} + 2,9 \frac{E_2 J_2 L}{G_2 R_2^2 L_2^3} \left( 1 - \frac{L_2}{2L} \right) - 0,92 \left( \frac{a}{L_2} - 1 \right) \right] + \\
 & + \frac{Pk}{12,5 R_2^2 G_2} (L - 0,5L_2), \quad - \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

де  $E_1$  і  $E_2$  – модулі пружності матеріалу робочого і опорного валків;  $G_1$  і  $G_2$  – модулі зсуву матеріалу робочого і опорного валків;  $J_1$  і  $J_2$  – моменти інерції перетинів робочого і опорного валків;  $a$  – відстань між осями натискних гвинтів;  $k$  – коефіцієнт ( $k = 1,2$ );  $Q$  – сила противигину валка.

Моменти інерції рівні:

$$J_1 = 0,785 R_1^4; \quad J_2 = 0,785 R_2^4,$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – радіуси робочого і опорного валків.

Модулі пружності і зрушення рівні:

сталеві валки	чавунні валки
$E = 220000 \text{ Н/мм}^2;$	$E = 186000 \text{ Н/мм}^2;$
$G = 87000 \text{ Н/мм}^2;$	$G = 73500 \text{ Н/мм}^2;$

Прогини валків компенсують початковим профілюванням бочок робочого або (и) опорного валків. Проте форма і розміри зазора між робочими валками визначається і іншими чинниками. У загальному вигляді величина опуклості або угнутості бочки твірної робочого валка може бути визначена наступним чином

$$f_P = \left[ W_1 + W_2 - 0,5\delta_n \left( \frac{L_2}{B} \right)^2 \right] \left( \frac{L}{L_2} \right)^2 - 0,5(f_{OI} - \delta_{OI}) - \Delta \Delta t, \quad (4.7)$$

де  $\delta_{\Pi}$  - поперечна різнотовщинність штаби в кліті;  $L_2$  - активна довжина бочки опорного валка (без урізів, скосів);  $B$  - ширина штаби;  $L$  - повна довжина бочки опорного (робочого) валка;  $f_{оп}$  - початкова опуклість опорного валка або опуклість в результаті розігрівання;  $\delta_{оп}$  - знос опорного валка;  $\Delta D_t$  - теплова опуклість робочого валка, мм

$$\Delta D_t = 0,155 \sqrt[3]{(\Delta t / 35)^2}, \quad (4.8)$$

де  $\Delta t$  - градієнт температур (град.) по довжині бочки валка (експериментальні дані або задані).

**Приклад.** Визначити прогини робочого і опорного валків кліті широкоштабового стана 700/1400×1700 мм гарячої прокатки при силі прокатки  $P = 20$  МН; відстань між осями натискних гвинтів  $a = 2650$  мм,  $L_2 = 1550$  мм, ширина штаби  $B = 1200$  мм. Визначимо коефіцієнт  $n$  при  $f_{оп} = 0$ :

$$n = 0,86 + 0,97 \cdot 0,77(1,9 - 1) - 5,9 \cdot 0,5(1 - 0,78) \cdot 0,585 = 0,54;$$

$$n_1 = 0,87 + 3,15 \cdot (0,71 - 0,39)^4 = 0,9.$$

Моменти інерції дорівнюють:

$$J_1 = \frac{3,14}{64} 700^4 = 0,012 \cdot 10^{12}, \text{ мм}^4;$$

$$J_2 = \frac{3,14}{64} 1400^4 = 0,19 \cdot 10^{12}, \text{ мм}^4.$$

Прогин робочого валка:

$$W_1 = \frac{2 \cdot 1,55^3 \cdot 10^{16}}{384 \cdot 1,5 \cdot 0,012 \cdot 10^{17}} \left\{ \frac{3}{2,54} (3 - 0,77) - 0,46 \frac{3}{2,9} \left[ 1 - 4 \cdot 1,29 + \right. \right. \\ \left. \left. + 6 \cdot 1,67 - 8 \cdot 0,1(0,5 \cdot 2,46 - 0,167 \cdot 2,1 - 0,12) \right] \right\} + \frac{2 \cdot 1,55 \cdot 1,2 \cdot 10^{10}}{12,6 \cdot 0,13 \cdot 4,5 \cdot 10^{10}} \\ \left[ \frac{3}{2,54} \left[ (0,5 - 0,115) - 0,77 \frac{3}{2,9} (0,5 - 0,025) \right] \right] = 0,09 \text{ мм.}$$

Прогин опорного валка:

$$W_2 = \frac{2 \cdot 1,55^3 \cdot 10^{16}}{29,5 \cdot 2,2 \cdot 0,19 \cdot 10^{17}} \left[ \frac{1 + 2 \cdot 0,54}{2 + 0,54} + 2,9 \frac{2,2 \cdot 0,19 \cdot 1,55 \cdot 10^{20} \cdot 0,55}{0,82 \cdot 0,7^2 \cdot 1,55^3 \cdot 10^{20}} - 0,92(1,7 - 1,0) \right] + 0,043 = 0,096 \text{ мм.}$$

Опуклість одного робочого валка рівна ( $\delta_n = 0,06$  мм;  $\Delta D_i = 0$ ):

$$f_p = \left[ 0,09 + 0,096 - 0,5 \cdot 0,06 \left( \frac{1550}{1200} \right)^2 \right] \left( \frac{1700}{1550} \right)^2 \approx 16 \text{ мм.}$$

#### 4.18. Розрахунок енергосилових параметрів прокатки

Сумарне обтиснення при холодному прокатуванні штаб знаходиться в межах 45 – 75% і визначається отриманням необхідних механічних властивостей готових штаб після прокатки, віддалу і дресування. Величина сумарного обтиснення залежить від кількості клітей, товщини і матеріалу штаби. Ширина штаби впливає на сумарне обтиснення спільно із товщиною штаби. Звичайно більшій ширині штаби відповідає більша товщина і менше сумарне обтиснення. З табл. 4.9 витікає, що із збільшенням кількості клітей з чотирьох до п'яти (стан 2030) сумарне обтиснення зростає з  $\varepsilon_{\Sigma} = 0,64$  до  $\varepsilon_{\Sigma} = 0,714$ , тобто в 1,12 разу. Аналіз режимів деформацій штаб різних розмірів показує, що залежності сумарного обтиснення від товщини штаби мають параболічний характер.

На ШСХП має місце різний характер розподілу  $\Delta h$  ( $\varepsilon$ ) по клітях стана. Так, на ШСХП 1680 прийнята схема (а) (рис. 4.33), при якій максимальне обтиснення доводиться на кліть 1. В цьому випадку максимально використовуються пластичні властивості незміцненого металу, рівномірно розподіляються силові навантаження по клітях стана. Застосування варіантів (б, в) обтиснень (зменшення обтиснень в кліть 1) покращує умови захвату металу валками і забезпечує зменшення поздовжньої різнотовщинності штаби.



Таблиця 4.9. Режими деформації штаби 1×1100 із сталі марки Ст. 2 кп на різних станах холодної прокатки

№№ кліт	Параметри прокатки (мм), по станах								
	1680			1700			2030		
	h	$\Delta h$	$\varepsilon_{\Sigma}$	h	$\Delta h$	$\varepsilon_{\Sigma}$	h	$\Delta h$	$\varepsilon_{\Sigma}$
1	1,77	0,93	0,345	2,2	0,60	0,214	2,68	0,82	0,234
2	1,37	0,40	0,492	1,55	0,65	0,447	1,9	0,78	0,457
3	1,07	0,29	0,60	1,15	0,40	0,59	1,4	0,50	0,60
4	0,97	0,10	0,64	1,0	0,15	0,643	1,12	0,28	0,68
5	-	-	-	-	-	-	1,0	0,12	0,714

Аналіз режимів деформацій штаб всього сортаменту на чотирьохвалковому стані, показує наступний розподіл приватних обтиснень по клітках стана [64, 79]:

№ кліт	1	2	3	4
$\Delta h_i / \Delta h_{\Sigma}$	0,5 – 0,55	0,23 – 0,3	0,16 – 0,18	0,06 – 0,08

де  $\Delta h_{\Sigma}$  – сумарне обтиснення в чотирьох клітках стана.

Для п'ятиклітьового стана 2030 в першому наближенні можна прийняти наступний розподіл приватних обтиснень:

№ кліт	1	2	3	4	5
$\Delta h_i / \Delta h_{\Sigma}$	0,33	0,31	0,2	0,11	0,05

Ці дані можуть бути використані для попереднього розрахунку параметрів прокатки (див. також п.4.19).

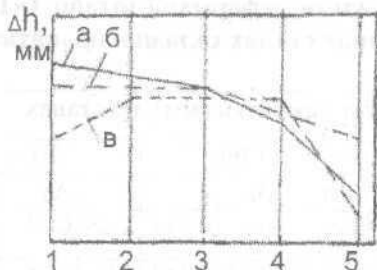


Рис. 4.33. Розподіл (а – б) абсолютних обтиснень по клітках (1 – 5) ПСХП

**Приклад:** Виконаємо розрахунок енергосилових параметрів при прокатуванні штаб із сталі марки Ст.2кп з розмірами  $1 \times 1000$  мм на ПСХП 2030. Характеристика стана дана в п. 4.3. Відповідно до відомих даних приймаємо шорсткості робочих валків ( $R_a$ , мкм):

№ кліті	1	2 - 4	5
$R_a$ , мкм	5,0	1,5	4,5;

Смазочно-охолоджуюча рідина – емульсія мінерального масла з концентрацією  $\sim 4\%$ .

Можливе сумарне відносне обтиснення ( $h = 1$  мм),  $\varepsilon_{\Sigma} = 0,71$ , а початкова товщина штаби буде рівна

$$H = h / (1 - \varepsilon_{\Sigma}) = 1 / (1 - 0,71) \approx 3,5 \text{ мм}$$

У табл.4.3 товщина гарячекатаного підкату рівна  $H = 3,5$  мм.

**Кліть 1.** Визначимо параметри прокатки в кліті 1. Швидкість валків в п'ятій кліті рівна  $v_5 = 21,9$  м/с, то з умови постійності секундних об'ємів знаходимо (табл. 4.9)

$$v_1 = h_5 \cdot v_5 / h_1 = 1 \cdot 21,9 / 2,68 = 8,16 \text{ м/с.}$$

Сумарне абсолютне обтиснення штаби в стані дорівнює

$$\Delta h_{\Sigma} = H - h_5 = 3,5 - 1,0 = 2,5 \text{ мм.}$$

Обтиснення по клітках визначаємо із параметра  $\Delta h_1 / \Delta h_{\Sigma}$  слідуючим чином

$$\Delta h_1 = (\Delta h_1 / \Delta h_{\Sigma}) \cdot \Delta h_{\Sigma} = 0,33 \cdot 2,5 \approx 0,82 \text{ мм,}$$

що відповідає табл.4.9. Відносне обтиснення у кліті №1 дорівнює  $\varepsilon = \Delta h_1 / H = 0,82/3,5 = 0,234$ .

Визначимо коефіцієнти тертя і інші параметри по формулах робіт [20, 64] при початковій температурі деформації  $t = 25^\circ\text{C}$ .

1. Коефіцієнт тертя дорівнює

$$f = f_0 \cdot k_d \cdot k_n \cdot k_{cm} \cdot k_t, \quad (4.8)$$

де  $f_0$  – базовий коефіцієнт тертя;  $k_d$ ,  $k_n$ ,  $k_{cm}$ ,  $k_t$  – поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно величину обтиснення, шорсткість поверхні штаби, тип технологічного мастила і початкову (перед кліттю) температуру штаби.

Базовий коефіцієнт тертя дорівнює:

при  $v < 7,5$  м/с

$$f_0 = 0,076 - 0,0019v + 0,031(R_a - 0,6) \times \quad (4.9)$$

$\times [(1,07 - 0,14v)^3 + 0,054v - 0,26];$

при  $v > 7,5$  м/с

$$f_0 = k_v \cdot [0,062 + 0,005(R_a - 0,6)]. \quad (4.10)$$

Коефіцієнти  $k_d$  і  $k_n$  рівні:

$$\left. \begin{aligned} k_d &= 0,5 + 1,77\varepsilon + 0,165R_a(1 - 3,33 \cdot \varepsilon) \\ k_n &= 1,09 - 0,05R_{an} \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

де  $R_{an}$  – шорсткість поверхні штаби.

Шорсткість поверхні гарячекатаного металу можна приймати 3-5 мкм, а після клітей стану холодної прокатки  $R_{an} \approx 0,5R_a$  тобто половині висоти шорсткості валків.

Коефіцієнт  $k_v$  рівний: при  $v < 8,0$  м/с –  $k_v = 1$ , а при  $v > 8$  м/с маємо

$$k_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025v)^2. \quad (4.11)$$

Коефіцієнт  $k_t$  визначимо по формулі

$$k_t = a + c(1,11 - 0,0044 \cdot t_H)^n \quad (4.12)$$

де  $t_n$  – температура металу перед осередком деформації, °С;  
а, с, n – коефіцієнти, рівні:

для мінеральної емульсії, масел – ИС – 20, ПКС – 1:

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot \epsilon; \quad c = 1,2 - 2,8 \cdot \epsilon; \quad n = 3,84 - 5,7 \cdot \epsilon; \quad (4.13)$$

для мастила ТЭМП – 1 коефіцієнти, дорівнюють:

$$a = 1,19; \quad c = -0,31; \quad n = 2,0.$$

Коефіцієнт  $k_{см}$  дорівнює: емульсія мінерального масла –  $k_{см} = 1,0$ ; бавовняне натуральне масло –  $k_{см} = 0,94$ ; соняшникова гідрогенізована олія (ПКС) –  $k_{см} = 0,85$ ; пальмова олія –  $k_{см} = 0,83$ ; бавовняне полімеризована олія –  $k_{см} = 0,56$ .

Тобто, чим більша в'язкість мастила і кількості в ній ПАР (поверхнево – активних речовин), тим ефективніше технологічне мастило [25, 35]. Для приведених початкових даних по формулах (4.8) – (4.13) ( $k_{см} = 1,0$ ;  $k_v \approx 1$ ;  $R_{вп} = 2,5$  мкм) одержимо:

$$f_0 = 0,062 + 0,005(5 - 0,6) = 0,084;$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,234 + 0,165 \cdot 5(1 - 3,33 \cdot 0,234) = 1,08;$$

$$k_{дл} = 1,09 - 0,05 \cdot 2,5 = 0,97.$$

Для розрахунку коефіцієнта  $k_t$  в кліті 1 початкову температуру штаби можна приймати в межах 20–30 °С. У подальших клітках початкову температуру штаби перед кліткою слід приймати рівній кінцевій температурі  $t_k$  в попередній кліті з урахуванням охолодження на міжвалкової ділянці. Для нашого прикладу в кліті 1 приймаємо  $t_n = 25^0\text{С}$  і коефіцієнт  $k_t$  з формули (4.12) рівний:

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot 0,237 \approx 0,7;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot 0,237 \approx 0,53;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot 0,237 \approx 2,46;$$

$$k_t = 0,7 + 0,53(1,11 + 0,0044 \cdot 25)^{2,46} = 1,23.$$

Загальна величина коефіцієнта тертя з формули (4.8) складає ( $k_v \approx 1,0$ )

$$f = 0,084 \cdot 1,08 \cdot 0,97 \cdot 1,23 = 0,108.$$

Показник тертя з формули (2.10) [20, 64] рівний:

$$f_{II} = 1,6f - 0,018;$$

$$f_n = 1,6 \cdot 0,108 - 0,018 = 0,155.$$

2. Розрахуємо напруження течії металу [20, 69]. Сталь марки Ст. 2 кп містить наступні хімічні елементи (%): (0,09 - 0,15) С;  $\leq 0,03$  Si; (0,35 - 0,5) Mn. Вуглецевий еквівалент для вуглецевої сталі в загальному випадку рівний

$$C_3 = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4}. \quad (4.14)$$

Базове (початкове після відпалу) напруження течії та його приріст за рахунок зміцнення при  $\varepsilon = 40\%$  відповідно рівні:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{T0} &= 210 + 263C_3; \\ \Delta\sigma_T &= 209 + 460C_3. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Коефіцієнт, що враховує обтиснення, рівний:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\Sigma} &= 0 - 0,4 \\ k_{\varepsilon} &= 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_{\Sigma}}{0,4}\right)^{1,5+C} ; \\ \varepsilon_{\Sigma} &\geq 0,40 - 0,7 \\ k_{\varepsilon} &= 1 + 0,87(\varepsilon_{\Sigma} - 0,4)^{0,5} \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Напруження течії металу після кліті визначають по формулі

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_{\varepsilon} \quad (4.16)$$

Напруження течії розраховуємо при максимальному вмісті хімічних елементів в сталі [(4.14) - (4.16)]:

$$C_3 = 0,15 + 0,001 + 0,083 = 0,234;$$

$$\sigma_{T0} = 210 + 263 \cdot 0,234 = 271,6 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\Delta\sigma_T = 209 + 460 \cdot 0,234 = 318 \text{ Н/мм}^2;$$

$$k_{\varepsilon} = 1 - \left(1 - \frac{0,237}{0,4}\right)^{1,65} = 0,77;$$

$$\sigma_{T1} = 271,6 + 318 \cdot 0,77 = 515,6 \text{ Н/мм}^2.$$

В результаті впливу швидкості і температури деформації напруження течії металу при холодному прокатуванні змінюється в порівнянні з одержаним по формулі (4.16). Відповідно до досліджень [40] врахувати цей вплив пропонується спеціальними коефіцієнтами [20, 64].

$$\sigma'_{T1} = n_u \cdot n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_c \quad (4.17)$$

Напруження течії металу на міжвалковому проміжку (перед подальшою кліткою), за відсутності деформації визначимо по формулі ( $n_U = 1,0$ )

$$\sigma_{T1} = n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_c \quad (4.18)$$

Середній опір металу в осередку деформації дорівнює

$$\sigma_\phi = 1,15 \left[ \sigma_{T(i-1)} + 0,67 (\sigma'_{T1} - \sigma_{T(i-1)}) \right] \quad (4.19)$$

де  $\sigma_{T(i-1)}$  - напруження течії металу перед кліткою (проходом) [формула (4.18)];  $\sigma'_{T1}$  - напруження течії металу після кліти (проходу) [формула (4.17)];  $n_u$  і  $n_t$  - відповідно коефіцієнти, що враховують швидкість деформації і температуру, визначаються з формул:

$$\left. \begin{aligned} n_u &= 1 + 0,38 \left( 0,5 + \frac{\ln u}{13,8} \right)^2 ; \\ n_t &= 0,8 + 0,23 \left( 1 - \frac{t_u}{300} \right)^2 . \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

Швидкість деформації визначаємо по виразу [20]

$$u = v \cdot \varepsilon / l_c \quad (4.21)$$

де  $l_c$  - довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби;  $v$  - швидкість в мм/с.

Оскільки довжина дуги  $l_c$  поки невідома заздалегідь приймаємо  $l_c / l_a$ : кліть 1, 2 – (1,3 – 1,4); кліть 3 – (1,4 – 1,5); кліть 4 – (1,6 – 1,7); кліть 5 – (1,7 – 2,0).

Для кліть 1 маємо ( $D=600$ мм,  $v=8,16$ м/с)

$$l_c = 1,4 \sqrt{R \cdot \Delta h} = 1,4 \sqrt{300 \cdot 0,82} = 22,4 \text{ мм}$$

і з формули (4.21) одержимо

$$n = 8160 \cdot 0,234 / 22,4 = 86,5 \text{ с}^{-1}$$

З формул (4.20) одержимо:

$$n_n = 1 + 0,38 \left( 0,5 + \frac{4,46}{13,8} \right)^2 = 1,254;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left( 1 - \frac{25}{300} \right)^2 = 0,993.$$

Тоді з формул (4.17) і (4.18) одержимо

$$\sigma'_{T1} = 1,254 \cdot 0,993 \cdot 271,6 + 318 \cdot 0,77 = 583 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T1} = 0,993 \cdot 271,6 + 318 \cdot 0,77 = 515,6 \text{ Н/мм}^2.$$

З формули (4.19) одержимо

$$\sigma_\phi = 1,15 \cdot [271,6 + 0,67(583 - 271,6)] = 553 \text{ Н / мм}^2$$

3. Довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби рівна (сталеві валки):

$$l_c = \frac{c + \sqrt{c^2 + 4R\Delta h \left( 1 - c \frac{f_n}{2h_{cp}} \right)}}{2 \left( 1 - c \frac{f_n}{2h_{cp}} \right)}; \quad (4.22)$$

$$c = n_{cp} \cdot \sigma_\phi \frac{R}{47500}; \quad (4.23)$$

$$x_2 = n_1 \cdot \sigma_{\phi 1} \frac{R}{95000};$$

$$l_c = l'_c + x_2 \quad (4.24)$$

де  $R$  – радіус жорсткого валка;  $n_{cp}$  і  $n_1$  – коефіцієнти, що враховують вплив середніх напружень натягання і напруження натягання переднього кінця штаби:

$$n_{cp} = 1 - \frac{\sigma_n + \sigma_3}{2\sigma_\phi}; \quad n_1 = 1 - \frac{\sigma_{II}}{\sigma_{\phi 1}}, \quad (4.25)$$

де  $\sigma_n, \sigma_3$  – напруження переднього і заднього натягань.

Напруження натягання змінюються в широких межах. Для неперервного стана перед кліттю 1 напруження  $\sigma_3 = 20 - 30$  Н/мм<sup>2</sup>. Після чистової кліті  $\sigma_{II} = 40$  Н/мм<sup>2</sup>. На міжклітьових проміжних ділянках

$$\sigma_{II} = \sigma_3 = (0,1 - 0,2) \sigma_{T1}; \quad \sigma_{\phi 1} = 1,15 \sigma'_{T1}$$

Оскільки розрахунок виконуємо для кліті 1, то приймаємо  $\sigma_3 = 25$  Н/мм<sup>2</sup>, а  $\sigma_{II} = 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 515,6 = 77,5$  Н/мм<sup>2</sup>.

З формул (4.25) знайдемо:

$$n_{cp} = 1 - \frac{25 + 77,5}{2 \cdot 553} = 0,91; \quad n_1 = 1 - \frac{77,5}{1,15 \cdot 515,6} \approx 0,9$$

З формул (4.23) знаходимо параметри  $c$  і  $x_2$ :

$$c = 0,91 \cdot 553 \frac{300}{47500} = 3,2 \text{ мм};$$

$$x_2 \approx 0,9 \cdot 670 \frac{300}{95000} = 1,7 \text{ мм}.$$

Складова дуги контакту із формули (4.22) рівна

$$l_c = \frac{3,20 + \sqrt{10,3 + 4 \cdot 300 \cdot 0,82 \left( 1 - 3,20 \frac{0,155}{2 \cdot 3,07} \right)}}{2 \left( 1 - 3,20 \frac{0,155}{2 \cdot 3,07} \right)} = 18,1 \text{ мм}.$$



Повна довжина дуги контакту з (4.24) рівна

$$l_c = 18,1 + 1,70 = 19,80 \text{ мм.}$$

4. Знаходимо енергосилові параметри прокатки. Середнє нормальне контактне напруження рівно ( $f_n = 0,12$ ,  $C_H = 0,48$ )

$$p_{cp}' = \sigma_{cp} \left( 1 + C_H \cdot f_n \cdot l_c / h_{cp} \right) \quad (4.26)$$

і з урахуванням натягнення

$$p_{cp} = p_{cp}' \left( 1 - \frac{\sigma_n + \sigma_s}{2p_{cp}'} \right). \quad (4.27)$$

Всі параметри відомі, то одержимо

$$p_{cp}' = 553(1 + 0,48 \cdot 0,155 \cdot 19,8 / 3,07) = 820 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp} = 820 \left( 1 - \frac{25 + 77,5}{1640} \right) = 770 \text{ Н/мм}^2.$$

Сила прокатки з (1.31)

$$P = p_{cp} \cdot l_c \cdot B$$

$$P = 770 \cdot 0,0198 \cdot 1,1 = 16,9 \text{ МН.}$$

Момент прокатки з урахуванням впливу натягання рівний (на двох валках)

$$M = 2\psi \cdot P \cdot l_c + H \cdot B \cdot R \cdot \sigma_s \cdot 10^{-6} \left( 1 - \frac{h}{H} \cdot \frac{b}{B} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s} \right) \quad (4.28)$$

$\psi$  - коефіцієнт положення рівнодіючої сил.

З роботи [39] витікає, що

$$\psi = 0,48(l_d/l_c)^2; \quad (4.29)$$

$$\psi = 0,48 \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,83}}{19,8} \right)^2 = 0,302.$$

Момент кручення з формули (4.28) на двох валках ( $b/B \approx 1$ )

$$M = 2 \cdot 0,302 \cdot 16,9 \cdot 0,0198 + 3,5 \cdot 1100 \cdot 0,3 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \times \\ \times (1 - 0,76 \cdot 3,11) = 0,207 - 0,053 = 0,154 \text{ МН} \cdot \text{м.}$$

Потужність на бочці валків

$$N = 960 \cdot 0,154 \cdot 8,16 / 0,3 = 4030 \text{ кВт}$$

що менше потужності встановленого двигуна ( $N_{\text{дв}} = 8400$  кВт).

5. Визначимо температуру  $t_k$  штаби на виході з кліті по формулі [20,64]

$$t_k = \varphi t_n + \Delta t, \quad (4.30)$$

де  $\varphi$  - коефіцієнт, що враховує втрати температури штаби на міжклітьової ділянці;  $\Delta t$  - приріст температури в осередку деформації [68]:

$$\Delta t = 0,05 m \cdot (p_{cp} + \sigma_\phi) \ln H/h, \quad (4.31)$$

де  $m$  - коефіцієнт, рівний для низковуглецевої сталі

$$m = 2,2 - 0,65 \left( \frac{t_n}{480} - 0,042 \right)^{1,4}. \quad (4.32)$$

Для наших умов одержимо (для кліті 1 приймаємо  $\varphi = 1$ ):

$$m = 2,2 - 0,65 \left( \frac{25}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,175$$

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,175 (770 + 553) \ln 3,5 / 2,67 = 38,3^\circ\text{C}$$

$$t_k = \varphi \cdot 25 + 38,3 = 63,3^\circ\text{C}$$

**Кліть 2.** Визначимо швидкість прокатки в кліті 2 (табл.4.9) ( $h_2 = 1,9$  мм,  $\Delta h_2 = 0,78$ ; шорсткість валків -  $1,5$  мкм  $R_a$ )

$$v_2 = h_3 \cdot v_3 / h_2 = 1 \cdot 21,9 / 1,9 = 11,56 \text{ м/с.}$$

Решту параметрів визначимо по алгоритму розрахунку для кліті 1:

$$k_v = 0,56 + 0,7 (1 - 0,025 v)^2 = 0,56 + 0,7 (1 - 0,025 \cdot 11,56)^2 = 0,91;$$

$$f_0 = k_v [0,062 + 0,005 (R_a - 0,6)] =$$

$$= 0,91 (0,062 + 0,005 \cdot 0,9) \approx 0,06;$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,291 + 0,165 \cdot 1,5 (1 - 3,33 \cdot 0,291) = 1,04;$$

$$k_n = 1,05 - 0,05 \cdot R_{an} = 1,05 - 0,05 \cdot 2,5 = 0,93.$$

Шорсткість поверхності штаби перед кліткою приймають рівною  $R_{an} = 0,5 \cdot R_{a(1)}$ , тобто рівній половині висоти шорсткості валків після попередньої кліти. Коефіцієнт  $k_{cm}$  для емульсії мінерального масла приймають рівним  $k_{cm} = 1$ .

Далі маємо (температуру  $t_n$  приймаємо із розрахунку кліти 1-  $t_k \approx 63,0^\circ\text{C}$  при  $\varphi = 0,8$ ):

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot 0,291 \approx 0,81;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot 0,291 \approx 0,38;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot 0,291 \approx 2,17;$$

$$k_t = 0,81 + 0,38(1,11 - 0,0044 \cdot 63)^{2,17} = 1,03;$$

$$f_0 = 0,061 \cdot 1,04 \cdot 0,93 \cdot 1,03 = 0,063.$$

$$f_n = 1,6 \cdot 0,063 - 0,018 = 0,082;$$

Для подальших міжкліткових проміжків коефіцієнт  $\varphi$  приймаємо рівним 0,75-0,6 (чим менша товщина штаби, тим менше значення коефіцієнта  $\varphi$ ).

Сумарне обтиснення в двох клітках (кліти 1 і 2) рівне

$$\varepsilon_\Sigma = \frac{H_0 - h_2}{H_0} = \frac{3,5 - 1,9}{3,5} = 0,458$$

Початкове напруження течії підкату  $\sigma_{т0}$  розраховано раніше (для кліти 1) і воно рівне  $\sigma_{т0} = 271,6 \text{ Н/мм}^2$ . Зміцнення металу при  $\varepsilon_\Sigma = 0,4$  також визначене раніше і воно рівне  $\Delta\sigma_{т0} = 318 \text{ Н/мм}^2$ . Визначимо коефіцієнт зміцнення металу  $k_\varepsilon$  при  $\varepsilon_\Sigma > 0,4$  по формулі (4.15)

$$k_\varepsilon = 1 + 0,87(0,468 - 0,4)^{0,5} = 1,025;$$

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{300 \cdot 0,78} = 15,3 \text{ мм};$$

$$l_c = 1,35 \cdot l_d = 1,35 \cdot 15,3 = 20,7 \text{ мм};$$

$$u = v \cdot \varepsilon / l_c = 1150 \cdot 0,291 / 20,7 = 163 \text{ с}^{-1};$$

$$n_u = 1 + 0,38 \left( 0,5 + \frac{\ln u}{13,8} \right)^2 = 1 + 0,38 \left( 0,5 + \frac{5,09}{13,8} \right)^2 = 1,33;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left( 1 - \frac{t_n}{300} \right)^2 = 0,8 + 0,23 \left( 1 - \frac{63}{300} \right)^2 = 0,98;$$

$$\sigma'_{T1} = n_t \sigma_{t0} + \Delta \sigma_T k_s = 1,33 \cdot 0,98 \cdot 271,6 + 318 \cdot 1,09 = 673 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T1} = 0,98 \cdot 271,6 + 318 \cdot 1,025 = 582 \text{ Н/мм}^2,$$

$\sigma_{T1}$  – напруження течії металу в міжвалковому проміжку, (перед подальшою кліткою).

При розрахунку опору металу в клітці 2 (і подальших клітках) визначають  $\sigma_\phi$  з урахуванням зміцнення металу в попередній клітці [див. формулу (4.18)].

Опір металу деформації  $\sigma_\phi$

$$\sigma_\phi = 1,15 \left[ 515,6 \cdot 0,98 + 0,67 (673 - 515,6 \cdot 0,98) \right] = 710$$

Н/мм<sup>2</sup>.

Задне і переднє натягнення штаби в клітці 2 і інші параметри рівні:

$$\sigma_3 = 0,15 \cdot \sigma_{T1(i-1)} = 0,15 \cdot 515,6 = 77,5 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{II} = 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 582 = 87 \text{ Н/мм}^2;$$

$$n_{cp} = 1 - \frac{\sigma_3 + \sigma_{II}}{2 \cdot \sigma_\phi} = 1 - \frac{77,5 + 87}{1420} \approx 0,88;$$

$$n_1 = 1 - \frac{\sigma_{II}}{\sigma_\phi} = 1 - \frac{87}{710} = 0,88.$$

Допоміжні параметри і довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби (валки сталеві):

$$c = n_{cp} \cdot \sigma_\phi \frac{R}{47500} = 0,88 \cdot 710 \frac{300}{47500} = 3,96 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\phi 1} = 1,15 \cdot \sigma'_{m1} = 1,15 \cdot 673 = 775 \text{ МПа};$$

$$x_2 = n_1 \cdot \sigma_{\phi 1} \frac{R}{95000} = 0,88 \cdot 775 \frac{300}{95000} = 2,15 \text{ мм};$$

$$h_{op} = \sqrt{H \cdot h} = \sqrt{2,68 \cdot 1,9} = 2,26 \text{ мм};$$

$$l_c = \frac{c + \sqrt{c^2 + 4R \cdot \Delta h \left(1 - c \frac{f_n}{2h_{cp}}\right)}}{2 \left(1 - c \frac{f_n}{2h_{cp}}\right)} = \frac{3,96 + \sqrt{15,6 + 4 \cdot 300 \cdot 0,78 \left(1 - 3,96 \frac{0,062}{4,52}\right)}}{2 \left(1 - 3,96 \frac{0,062}{4,52}\right)} \approx 18,6 \text{ мм}$$

$$l_c = l'_c + x_2 = 18,6 + 2,15 = 20,75 \text{ мм.}$$

Знаходимо енергосилові параметри:

$$p'_{cp} = \sigma_{\phi} (1 + C_H \cdot f_{II} \cdot l_c / h_{cp}); \quad (4.33)$$

$$C_H = 0,17(1 + 14,7 \cdot f_n) \text{ при } f_n \leq 0,12;$$

$$C_H = 0,48 \text{ при } f_n \geq 0,12;$$

$$C_H = 0,17(1 + 14,7 \cdot 0,082) = 0,385;$$

$$p'_{cp} = 710(1 + 0,385 \cdot 0,082 \cdot 20,75 / 2,26) = 918 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp} = p'_{cp} \left(1 - \frac{\sigma_n + \sigma_s}{2p'_{cp}}\right) = 918 \left(1 - \frac{77,5 + 87}{1836}\right) = 832 \text{ Н/мм}^2.$$

$$P = p_{cp} \cdot l_c \cdot B = 832 \cdot 0,02075 \cdot 1,1 = 19,0 \text{ МН.}$$

$$\psi = 0,48(l_d / l_c)^2 = 0,48(\sqrt{300 \cdot 0,78} / 20,75)^2 = 0,259;$$

$$M = 2\psi \cdot P \cdot l_c + H \cdot B \cdot R \cdot \sigma_s \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{h}{H} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s}\right) =$$

$$= 2 \cdot 0,259 \cdot 19,0 \cdot 0,02075 + 2,68 \cdot 1,1 \cdot 0,3 \cdot 77,5 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{19}{2,68} \cdot \frac{87}{77,5}\right) =$$

$$= 0,205 + 0,014 = 0,219 \text{ МН} \cdot \text{м},$$

$$N = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 0,219 \cdot 11,56 / 0,3 = 7920 \text{ кВт.}$$

$$m = 2,2 - 0,65 \left( \frac{t_H}{480} - 0,042 \right)^{1,4} =$$

$$= 2,2 - 0,65 \left( \frac{63}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,17;$$

$$\Delta t = 0,05m \cdot (p_{cp} + \sigma_\phi) \ln H/h =$$

$$= 0,05 \cdot 2,17 (832 + 710) \ln 2,68/1,9 = 61^\circ\text{C};$$

$$t_k = \varphi t_H + \Delta t = 0,8 \cdot 63 + 61 = 112^\circ\text{C}.$$

Аналогічно виконуємо розрахунки і для інших клітей (табл. 4.10.). У табл. 4.10 потужність  $N$  відповідає умовам деформації на бочках валків. Урахування впливу тертя в шийках валків і деталях головної лінії стана приводить до збільшення потужності на валу двигуна на 7 – 12%.

Таблиця 4.10. Розрахункові параметри прокатки штаби 1x1100мм

№ клітей	$h$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\sigma_\phi$ , Н/мм <sup>2</sup>	$l_\infty$ , мм	$P_{cp}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$P$ , МН	$\Psi$	$M$ , МН·м	$N$ , кВт	$v$ , м/с	$t_k$ , °C	$f_{II}$
1	2,86	0,82	553	19,8	770	16,9	0,302	0,154	4030	8,17	63	0,155
2	1,9	0,78	710	20,75	832	19	0,259	0,215	7920	11,56	112	0,082
3	1,39	0,5	755	17,8	980	19,1	0,23	0,158	5860	15,8	180	0,078
4	1,12	0,27	800	15,0	1100	18,2	0,162	0,081	5030	19,6	222	0,084
5	1,0	0,12	827	12,49	925	12,7	0,11	0,065	4580	21,9	242,5	0,062

#### 4.19. Алгоритм розрахунку і аналіз режиму деформації неперервного стану холодної прокатки

На широкоштабових станах холодної прокатки (ШСХП) відносне обтиснення по клітках стану розподіляють по декількох варіантах [12, 19, 31 і ін.]:

1 - максимальне відносне обтиснення призначають в першій клітці стану; 2 - максимальне відносне обтиснення призначають в другій клітці стану; 3 - відносне обтиснення практично однакове у всіх клітках стану, окрім чистової, в якій воно менше; 4 - відносне обтиснення практично однакове у всіх клітках окрім першої, де воно менше.

У першому варіанті максимально використовують пластичні властивості гарячекатаного підкату при деформації металу в першій клітці стану при недостатній потужності електродвигунів в подальших клітках, а також при прокатуванні тонких штаб ( $h = 0,4 - 0,5$  мм) на п'ятикліткових станах. Крім того, цей режим деформації дозволяє збільшити товщину гарячекатаного підкату і разом з тим підвищити продуктивність широкоштабового стану гарячої прокатки.

Другий режим деформації штаб забезпечує вирівнювання поздовжньої різновтовщинності штаби в першій клітці при порівняно невеликому обтисненні ( $\epsilon = 14 - 25\%$ ) і достатній потужності приводів в подальших клітках. Раціональний розподіл відносного обтиснення в другому варіанті забезпечує прокатку штаб в 2х - 3х клітках стану з однаковим зусиллям металу на валки. Це дозволяє одержувати високу якість поперечного профілю штаби за рахунок однакових пружних деформацій валкового комплексу і подібної форми міжвалкового зазору в клітках. Відмічені вище достоїнства забезпечуються також при використанні третього варіанту режиму деформації. Четвертий варіант режиму деформації використовують при прокатуванні тонких штаб ( $h = 0,4 - 0,7$  мм) з метою збільшення товщини штаби перед чистовою кліткою і зниження вірогідності пориву штаби.

Сумарне обтиснення при холодному прокатуванні визначають з урахуванням вимог, що пред'являються до якості

готової продукції. Але за всіх умов величина сумарного обтиснення залежить від кінцевої товщини, ширини і матеріалу штаби, можливостей прокатного стану. У першому наближенні сумарне обтиснення при прокатуванні різних штаб можна визначити за даними табл. 4.11., які одержано за наслідками аналізу режимів деформації на ПСХП 1680 (меткомбінат «Запоріжсталь»), стані 1700 Маріупольського металургійного комбінату (ММК) і стані 2030 Новоліпецького металургійного комбінату (НЛМК). З табл.4.11 виходить, що сумарне обтиснення  $\epsilon_{\Sigma}$  зменшується з підвищенням міцності властивостей сталей і збільшенням кінцевої товщини  $h$  штаби.

Формули табл. 4.11 дійсні при розрахунку максимального відносного обтиснення всіх розмірів штаб по ширині для чотирьохкільцевих і п'ятикільцевих станів холодної прокатки. Проте при прокатуванні широких штаб зниження навантажень на устаткування досягається шляхом зменшення швидкості прокатки без зміни товщини підкату або шляхом одночасного зменшення швидкості прокатки і товщини підкату. Так, наприклад, на стані 2030 НЛМК при прокатуванні штаб  $h = 0,7$  мм із сталі марки Ст. 2кп [31] застосовують наступні режими залежно від ширини штаби  $B$ :

$B$ , мм	$H_0$ , мм	$\epsilon_{\Sigma}$ , %	$v$ , м/с
900	2,6	73,08	27,4
1100	2,6	73,08	27,4
1250	2,6	73,08	26,3
1600	2,6	73,08	22,1
1850	2,4	70,3	16,4

Як видно з приведених даних, при прокатуванні вузьких штаб ( $B/L_s = 0,42 - 0,54$ ;  $L_s$  - довжина бочки валка) режим деформації повністю ідентичний.

Збільшення сили прокатки пропорційно збільшенню ширини штаби. При прокатуванні штаб шириною  $B = 1250 - 1600$  мм ( $B/L_s = 0,61 - 0,79$ ) для запобігання перевантаженню



двигунів проводять зменшення швидкості прокатки. При прокатуванні штаб шириною  $B = 1850$  мм на  $\approx 8\%$ , знижують товщину підкату - с  $H_0 = 2,6$  мм до  $H_0 = 2,4$  мм і суттєво зменшують швидкість прокатки.

Особливістю режимів деформації на ШСХП є прокатка штаб по марках сталей, з близькими величинами початкового напруження течії (табл.4.11.) і товщині гарячекатаного підкату. На чотирьохкільтових станах з одного підкату прокатують два - три розміри кінцевих штаб. Так, на ШСХП 1680 меткомбината «Запоріжсталь» штаби з розмірами  $1,0 - 1,3 \times 1000 - 1500$  мм прокатують з гарячекатаного підкату товщиною  $H_0 = 3,0$  мм.

У чистових клітках ШСХП величина відносного обтиснення змінюється в межах  $6 - 30\%$ . Обтиснення в межах  $6 - 16\%$  застосовують для спрощення отримання штаб з високою якістю поперечного профілю. Якщо дозволяє потужність двигуна, то у ряді випадків в чистовій клітці при прокатуванні тонких штаб ( $h = 0,4 - 0,7$ ) застосовують відносне обтиснення в межах  $\epsilon = 20 - 30\%$ . При такому режимі деформації товщина штаби перед чистовою кліткою забезпечує зниження напружень заднього натягання і знижує вірогідність пориву штаби на міжкільтєвої ділянці.

Стосовно кожного стана, величина відносного обтиснення в чистовій клітці обумовлена, головним чином, отриманням високої якості поперечного профілю штаби і, як показує практика, залежить від товщини штаби і хімічного складу матеріалу. Для станів 1680, 1700 і 2030 емпіричні залежності відносного обтиснення в чистовій клітці для груп марок сталей представлені в табл.4.12.

Аналіз даних табл. 4.12. показує, що в умовах стана 1680 (ЗС) (потужність двигуна  $N_4 = 3300$ кВт), величина відносного обтиснення  $\epsilon_n$  в чистовій клітці зменшується із збільшенням товщини штаби і напруження течії металу. На стані 1700 (ММК) ( $N_4 = 4800$  кВт) при прокатуванні штаб завтовшки  $1 - 2$  мм величина відносного обтиснення  $\epsilon_n$  зменшується із збільшенням товщини штаби, але однакова для всіх марок стали і помітно вище, ніж на стані 1680. Проте на стані 1680 максимальне

обтиснення приходиться на першу кліть ( $N_1 = 3300$  кВт) (рис.4.35, крива I) при меншій потужності двигуна.

Таблиця 4.11. Сумарне відносне обтиснення для чотирьохклітьових станів 1680 і 1700 і п'ятиклітьового стану 2030

Група сталі	Марки сталі	Стан, розмір штаби, мм.	Формула для розрахунку
I	05кп, 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 08Ю, Ст. 1кп, Ст. 1пс	<b>1700 (1680)</b> $h < 2,0$ $B < 1500$	$\epsilon_{\Sigma} = 0,834 - 0,167h$
II	Ст.0, Ст.2кп, Ст.2пс, Ст.3кп, Ст.3пс, 15кп, 20кп, 15сп, 20сп, 15пс, 20пс, Ст.3сп	<b>1700 (1680)</b> $h < 2,0$ $B < 1500$	$\epsilon_{\Sigma} = 0,768 - 0,154h$
I	05кп, 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 08Ю, Ст.1кп, Ст. 1пс, Ст.2кп	<b>2030</b> 0,4 - 3,5 $B < 1850$	$\epsilon_{\Sigma} = 0,415 + 0,096(3,5 - h)^{1,2}$
I	05кп, 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 08Ю, Ст.1кп, Ст.1пс, Ст.2кп	<b>2030</b> 0,7 - 3,5 $B=1850$	$\epsilon_{\Sigma} = 0,365 + 0,103(3,5 - h)^{1,2}$

При прокатуванні штаб на стані, 2030 (НЛМК) наявність більшої кількості клітей і великих потужностей головних приводів ( $N_i = 8400$  кВт) дозволяє застосовувати режим деформації по варіанту б (рис. 4.33) при відносних обтиснення в першій клітці  $\epsilon_1 = 16-25\%$  і в чистовій  $\epsilon_c < 14\%$ . Режим деформації в клітях 2 - 4 проектується так, щоб забезпечити рівність сил і потужностей прокатки в цих клітях [31]. Цей режим деформації при збільшеній товщині підкату на стані 2030, в порівнянні із станом 1700, забезпечує зниження поздовжньої і поперечної різнотовщинності і високу якість форми штаб.

Таблиця 4.12. Залежності відносного обтиснення в чистовій клітї ШСХП 1680, 1700 і 2030 від товщини штаби і хімічного складу сталі

Марка сталі	Підприємство <sup>х)</sup>	Товщина штаби, мм	Розрахункова формула для $\epsilon_{\text{ч}}\%$
05кп, 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 08Ю, Ст. 1кп, Ст. 1пс	ЗС,НЛМК ММК ММК ММК	0,5 - 2,0 0,8-1,1 (В<1250) 1,0 - 2,0 0,4 - 0,7	$\epsilon_{\text{ч}} = 14,7 - 3,8 h$ $\epsilon_{\text{ч}} = 26,6 - 13,3 h$ $\epsilon_{\text{ч}} = 16 - 7(h - 1,0)^{0,7}$ $\epsilon_{\text{ч}} = 20 - 30$
Ст.3кп, 15кп, 20кп, 3сп, 15сп, 20сп, 15пс, 20пс	ММК	1,0 - 2,0	$\epsilon_{\text{ч}} = 16 - 7(h - 1,0)^{0,7}$
15кп, 15пс, Ст. 2кп (пс), Ст.3кп (пс)	ЗС,НЛМК	0,8 - 2,0	$\epsilon_{\text{ч}} = 11,2 - 3,5(h - 0,8)^{0,9}$
10, 15, 20кп, 20пс, 20, 25, Ст.3сп	ЗС,НЛМК	0,7 - 2,0	$\epsilon_{\text{ч}} = 12,5 - 6(h - 0,7)^{0,4}$
<sup>х)</sup> - ЗС - меткомбінат «Запоріжсталь» (4 - клітї); ММК - Маріупольський металургійний комбінат (4 - клітї); НЛМК - Новоліпедський металургійний комбінат (5 - клітї).			

Таким чином, раціональний для конкретного ШСХП режим деформації, повною мірою визначається кількістю клітей, потужністю приводів, законом розподілу обтиснень по клітях і наявністю систем регулювання міжвалкових зазорів і контролю площинності штаби. Проте за всіх вказаних вище умов раціональним слід рахувати рівність величин сил прокатки в найбільшій кількості клітей стана, що і підтверджується даними роботи [31]. При цьому з урахуванням, що режим деформації ( $h = \text{const}$ ) практично однаковий для штаб різної ширини, то при проектуванні режиму деформації енергосилові параметри слід розраховувати тільки для максимальної ширини штаби однієї марки сталі.

Алгоритм розрахунку режиму деформації штаби для п'ятиклітьового стана. У відмінності від відомих [12, 19], коли

для заданого режиму деформації розраховують енергосилові параметри, в даному алгоритмі, на підставі ітераційних операцій, варіант режиму деформації розраховують з умови рівності сил і потужності прокатки в декількох клітках. Крім того, використовуються практично встановлені величини сумарного обтиснення і обтиснення в чистовій клітці [68, 79].

1. Введення початкових даних (діаметр робочих валків  $D$ , діаметр і довжина шийки ( $d_w$  і  $l_w$ ) опорних валків, шорсткість робочих валків  $R_\alpha$ , напруження, що допускається на вигин опорних валків, розміри і матеріал штаби і т.п.)

2. Розрахунок сили прокатки, що допускається, виходячи з міцності валків по шийці опорного валка, визначають із формули

$$[P] = \frac{0,4 \cdot d_w^3 [\sigma_{us}]}{l_w}, \quad (4.34)$$

де  $d_w$  і  $l_w$  – діаметр і довжина шийки валка.

3. Визначимо сумарне обтиснення штаби ( $\varepsilon_\Sigma$ ) з формул табл. 4.11 для і різних станів і для відповідного розміру штаби, а також товщину гарячекатаного підкату:

$$\varepsilon_\Sigma = x_a - x_c h; \quad \varepsilon_\Sigma = x_a + x_c (3,5 - h)^{1,2};$$

$$H_0 = h / (1 - \varepsilon_\Sigma),$$

де  $x_a$  і  $x_c$  – числові коефіцієнти у формулах табл. 4.11.

4. Відносне обтиснення в чистовій клітці визначаємо з формул табл. 4.12.

$$\varepsilon_4 = x_a - x_c h,$$

$$\varepsilon_4 = x_a - x_c (h - x_d)^{n_a},$$

де  $x_d$  – числовий коефіцієнт;  $n_a$  – показник степіні;  $x_a$  і  $x_c$  – коефіцієнти (табл. 4.12).

Інші геометричні параметри в чистовій клітці ( $h_4 = h_5$ ;  $\varepsilon_4 = \varepsilon_5$ ) рівні:

$$H_{i=5} = h_{i-1} = h_4 / (1 - \varepsilon_4);$$

$$\Delta h_i = H_i \varepsilon_i$$

5. Сумарне абсолютне обтиснення в клітках (1 – 3) дорівнює

$$\sum \Delta h_{1-4} = H_0 - h - \Delta h_4,$$

де  $\Delta h_4$  - обтиснення в чистовій клітці

6. Задаємо по клітках 1-4 стана можливі відносні обтиснення. При цьому, відповідно до практики прокатки для клітці 1 по варіанту «б» розподілу обтиснень приймають (рис.4.33):

чотирьохклітьовий стан -  $\varepsilon_1 = (0,33-0,37) \varepsilon_{\Sigma}$ ;

п'ятиклітьовий стан -  $\varepsilon_1 = (0,31 - 0,33) \varepsilon_{\Sigma}$ ;

З урахуванням цього можна прийняти для стана наступні межі відносних обтиснень по клітках 1- 4-  $\varepsilon_1 = 0,15 - 0,35$ . Із збільшенням товщини штаби (при зменшенні сумарного обтиснення) верхню межу відносного обтиснення знижують. При проектуванні режиму деформації по вар. « $\alpha$ » (рис.4.33) в клітці 1 межа відносного обтиснення  $\varepsilon_1 = 0,25 - 0,4$ , а в проміжних клітках приймають  $\varepsilon_{2,4} = 0,2- 0,3$ . Це підвищує точність розрахунку енергосилових параметрів.

7. Виконуємо ітераційний процес для визначення величин обтиснень із умов рівності сил прокатки в клітках 1-3 (чотирьохклітьовий стан) і в клітках 1-4 (п'ятиклітьовий стан) або з інших умов. Приймаємо для п'ятиклітьового стана –  $v_{1-5} = 16 - 30$  м/с, для чотирьохклітьового стана:

першого покоління -  $v_{1-4} = 7,5 - 10$  м/с («Запоріжсталь»);

другого покоління -  $v_{1-4} = 12 - 25$  м/с (Маріуполь).

Розрахунок коефіцієнта  $f$  і показника  $f_n$  тертя, напруження течії  $\sigma_{T1}$ , і опору металу деформації  $\sigma_{ф1}$  (середнє, до і після прокатки), довжини дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби, і натягання ( $l_{cl}$ ), середнього контактного напруження  $p_{cp}$  з урахуванням натягання штаби, сили, крутного моменту і потужності прокатки. Розрахунок виконують для кожної клітці при  $\varepsilon'_1$  і  $\varepsilon''_1$  (див.п.4.18).

Напруження течії визначають з урахуванням швидкості і температури деформації (див. вище). Величини швидкості прокатки приймають з п.7.