О. Є. ЛАПШИН, О. О. ЛАПШИН, доктори техн. наук, професори,
М. В. ХУДИК, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ПІДНЯТТЄВИХ ВИРОБОК В ШАХТАХ

Мета. Метою цього дослідження є підвищення безпеки праці при проведенні гірничих виробок в умовах шахт. Для видобутку корисних копалин (залізна руда, кам'яне вугілля, мідні руди та ін.) при їх підземній розробці, гірничовидобувні підприємства проходять велику кількість гірничих виробок різного призначення (горизонтальні, вертикальні, похилі). Наявність розгалуженої системи гірничих виробок у шахтах створює великі труднощі для створення безпечних та комфортних умов праці за якістю складу шахтної атмосфери. Внаслідок низької ефективності вентиляції у вибоях тупикових виробок можуть відбуватись одиночні та групові гострі професійні отруєння, особливо при проведенні піднятєвих виробок, оскільки отруйні гази легші за повітря і збираються у верхній частині такої виробки.

Методи дослідження. На основі аналізу умов проведення піднятєвих гірничих виробок та узагальнення літературних джерел були визначені основні небезпечні і травмуючі фактори, а також описані заходи для зменшення їх негативного впливу на працюючих.

Наукова новизна. Надано характеристику небезпечного пилогазового утворення при проведенні піднятєвих виробок буро-підривним способом та обґрунтовано метод його знешкодження за допомогою активованої водоповітряної суміші.

Практична значимість. Розроблено конструкцію установки для знешкодження і видалення шкідливих пилогазових утворень після підривання шпурів за межі піднятєвої виробки. Застосування технічних засобів, які утворюють водоповітряну суміш, дозволяє нейтралізувати отруйні гази протягом регламентованого проміжку часу.

Результати. Наведено кількісні величини і концентрації шкідливих речовин, що утворюються під час підривання шпурів у вибоях виробок, дається аналіз способів і засобів їх неефективного провітрювання. Розроблено пристрій для знешкодження і видалення шкідливих пилогазових утворень з вибою виробки, що дозволяє підвищити безпеку працюючих при проведенні піднятєвих виробок в умовах шахт. Дається організаційний алгоритм виконання робіт для проведення піднятєвої виробки в умовах шахти.

Ключові слова: виробка, вибій, повітря, пил, гази, пристрій, вибух, безпека.

doi: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-51-56

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Розробка родовищ корисних копалин підземним способом потребує проведення великої кількості горизонтальних, похилих і вертикальних виробок. Провітрювання цих виробок ускладнюється відсутністю ефективного вентиляційного обладнання. Для цього використовуються громіздкі металеві трубопроводи та прогумовані рукава разом з вентиляторами місцевого провітрювання (ВМП), які утворюють надмірний шум, що шкідливо впливає на працюючих. Особливою складністю та небезпекою характеризуються процеси проведення піднятєвих виробок буро-підривним способом. Підривання шпурових зарядів у вибоях піднятєвих виробок супроводжується виділенням в атмосферу пилу і шкідливих газів. Провітрювання вибоїв таких піднятєвих ускладнюється тим, що під час вибухів відбувається руйнування вентиляційного трубопроводу, а його відновлення потребує додаткових витрат часу в робочому циклі проведення піднятєвого.

В роботі запропоновано спосіб очищення повітря від пилу і шкідливих газів у вибої піднятєвого за допомогою пристрою, який утворює водоповітряну суміш і подає її у вибій під час вибуху. В результаті взаємодії водоповітряної суміші з пилом і шкідливими газами відбувається їх нейтралізація за регламентований проміжок часу, що сприяє підвищенню безпеки при проведенні піднятєвої виробки.

Аналіз досліджень і публікацій. Питанням безпеки праці при проведенні гірничих виробок буро-підривним способом присвячені дослідження Гагауза Ф. Г., Лапшина О. О., Слюсаренка В. Г., Янова А. П., Ярембаша І. Ф. та ін., у яких викладені теоретичні і практичні питання знешкодження шкідливих викидів під час підривання шпурів [1].

Практичні рекомендації, що наводяться у відомих роботах, свідчать про доцільність використання зрошувальних систем для пилогазоподавлення. Перевага застосування зрошувальних систем є очевидною, оскільки вони характеризуються простотою і доступністю [2]. Частина публікацій присвячена розробленню способу зменшення пилогазоутворення при підриванні

шпурів в процесі проведення виробок із застосуванням внутрішньої водяної і гідрогелевої набивки, при цьому її об'єм рекомендовано приймати рівним 400 см³ в кожен шпур, ефективність пилогазоподавлення підвищується до 75-80 % [3].

Аналіз досліджень, пов'язаних з пилоподавленням, дає підставу вважати, що найбільш складним є нейтралізація шкідливих газів. Для зниження їх концентрації застосовується диспергована вода, при цьому застосовують зрошувачі ОК-1, ОЗ-1, ОЗ-2. Незважаючи на їх позитивні характеристики, щодо диспергування води, ефективність нейтралізації шкідливих газів становить 19,6 %, а знепилення 28,9 % [4].

В науково-дослідному інституті НДІБПГ для провітрювання і пилогазоподавлення при проведенні гірничих виробок запропоновано спосіб із застосуванням ежектора-піногенератора – ЕКГ [3]. Даний пристрій здійснює провітрювання і часткове пилоподавлення. Його застосування є неефективне, далекобійність струменя не перевищує 4 м, а на такій відстані апарат руйнується вибухом, тому цей піногенератор не знайшов застосування на шахтах Кривбасу.

На шахтах кольорової металургії для боротьби з пилом і газами найшли застосування гідропасті, які використовують як набивку шпурів [6, 7]. До складу гідропасті входить рідке скло, хлоридна кислота і розчин перекису водню (H₂O₂). Таку пасту подають в шпури стисненим повітрям. З метою уникнення отруєння і опіків, для приготування паст використовують розбавлену хлоридну кислоту. Така технологія приготування паст є неприйнятною для гірництва. До того ж випробування гідропаст в умовах шахт Березовського ШСУ засвідчило, що ефективність нейтралізації газів становить 50 %, а пилу – 58 % [8].

Для очищення рудникової атмосфери від пилу і газів рекомендовано використовувати дисперговану рідину, утворювану відцентровими форсунками. Автором були випробувані більше 100 форсунок з продуктивністю від 5 до 50 л/хв. Випробування показало, що ефективність очищення повітря від СО становить 25-30 % [2].

У підсумку можна констатувати, що зрошення пилогазової суміші дисперговою водою не отримало широкого застосування через низьку ефективність очищення від: пилу – не більше 75 %, диоксиду азоту – до 50 %, оксиду вуглецю – до 25 %.

Спільний вплив шкідливих газів і пилу на організм працюючих призводить до інтенсивного розвитку у них пилового бронхіту. Так, по даним інституту промислової медицини найбільш високий рівень професійних захворювань на пиловий бронхіт спостерігається у працівників при підземному видобуванні залізної руди [5].

Постановка задачі. Проведення гірничих виробок буро-підричним способом супроводжується виділенням в атмосферу великої кількості шкідливих газів і пилу, концентрації яких перевищують допустимі значення, що призводить до передчасної захворюваності працюючих на підземних роботах. У зв'язку із цим, завданням цього дослідження є визначення ефективних засобів нейтралізації шкідливих газопилових виділень та розроблення установки, що дозволить здійснювати повітрообмін у вибоях тупикових виробок.

Викладення матеріалу та результати. Аналіз способів нейтралізації шкідливих газів і пилу, які застосовуються при проведенні гірничих виробок дозволяє виділити дві основних групи. До першої групи відносяться способи нейтралізації шкідливих газів і пилу, які ґрунтуються на застосуванні диспергової води для вловлення пилових часток і розчинення шкідливих газів. До цієї групи можна віднести способи, що передбачають використання добавок хімічних речовин у водний розчин для підвищення ефекту пилогазоподавлення [8, 9].

До другої групи відносяться способи, які передбачають видалення продуктів вибуху з об'єму тупикової виробки шляхом провітрювання вибою вентиляторами або ежекторами з використанням стисненого повітря. Для аргументації наведеного вище надається табл. 1, яка містить різні способи нейтралізації газів і знепилення повітря у виробках [10].

Разом з цим пилогазоподавлення дисперговою водою має невисоку ефективність в межах 50-60 % пилу, 20-30 % оксиду вуглецю і 55-75 % оксидів азоту. Добавка хімічних речовин в дисперговану воду дозволяє підвищити уловлювання пилу на 5-10 %, проте підвищення нейтралізації шкідливих газів відбувається, в основному оксидів азоту, – на 15-20%, оксид вуглецю внаслідок своєї стійкості нейтралізується в присутності хімічних добавок незначно. Застосування сухих способів очищення забрудненого вибуховими роботами повітря не отримало застосування, незважаючи на досить високу ефективність і при остаточному виборі способу розглядатися не буде.

Аналіз способів гідропилогазоподавлення показав, що їх ефективність залежить від властивостей диспергової рідини (вода, водні розчини хімічних речовин), а також від засобів їх диспергування і подачі в зону викиду вибуховими роботами шкідливих домішок. Аналізуючи, ефективність застосовуваних засобів пилогазоподавлення звертаємо увагу на доступність їх використання в умовах проходки виробки. Так, гідронабивки, в основному використовуються при зарядці шпурів готовими патронами. При пневматичній зарядці гранульованими і порошковими вибуховими речовинами використання гідронабивки представляє певну складність [11-14].

Таблиця 1

Ефективність нейтралізації шкідливих газів і пилу при підриванні шпурів у виробках

Найменування способу	Технічна характеристика способу і умови застосування	Ефективність пилогазоподавлення, %		
		пилу	СО	NO+NO ₂
І. Гідропилогазоподавлення дисперговою водою				
Гідронабивка шпурів	Поліетиленові ампули діаметром 38-40 мм, довжиною 0,4 м; витрата - 0,4 л води на шпур. Застосовується при підриванні	51-52	14-15	45-48
Гідрогелева набивка шпурів	Поліетиленові ампули діаметром 38-40 мм, довжиною 0,3 м. Склад: аміачна селітра, рідке скло, вода. Застосовується при підриванні	50-75	25-50	75-80
Гідропастова набивка шпурів	Поліетиленові ампули діаметром 38-40 мм, довжиною 0,3 м. Склад: рідке скло, розчин слабкої хлоридної кислоти, 3% розчин перекису водню. Застосовується під час вибуху	60-61	40-42	56-58
Зовнішня гідронабивка шпурів	Оболонки (15-20 л на 1 м ² вибою) підвищуються у вибої. Вибухову речовину розміщують в середині оболонки. Застосовується під час вибуху	80-85	25-30	46-48
Зрошення дисперговою водою	Установка туманоутворювачів на відстані 10-15 м від вибою. Застосовується під час вибуху	48-51	12-14	42-45
	Установка форсунок механічної дії на відстані 40-50 м від вибою	75-80	25-30	70-80
Зрошення водою з установкою форсунок	Установка форсунок на відстані 10-15 м від вибою. В дисперговану воду подають 0,3-0,5 % розчин КМnO ₄ за допомогою дозатора. Застосовується під час вибуху	84-91	50-51	90-95
Зрошення водо-повітряною сумішшю з добавкою перекису водню (H ₂ O ₂)	Установка форсунок на відстані 10-15 м від вибою. В форсунку подається 3 %-ний розчин перекису водню. Застосовується після вибуху	60-61	40-42	56-58
Очистка повітря водяними струменями в трубопроводах	Трубопроводи для подачі та відсмоктування забрудненого повітря. Форсунки вмонтовані в трубопроводи	93-95	20-25	70-75

Використання зовнішньої гідронабивки (поліетиленові оболонки ємністю 15-20 л) вимагає виготовлення спеціального патрона і електродетонаторів у водонепроникних оболонках, які поміщаються в ємність наповнену водою. Наповнення оболонок водою, постачання їх патронами-бойовиками, а потім підвіска перед вибухом у виробці ускладнюють процес вибухових робіт, тому ці засоби не застосовуються.

Використання добавок хімічних речовин для підвищення ефективності пилогазоподавлення вимагає встановлення додаткового обладнання: спеціальних ємностей, дозаторних пристроїв, іншої запірної апаратури. До того ж обслуговування таких установок, вимагає спеціальної підготовки гірників і прийняття додаткових заходів безпеки, пов'язаних із зберіганням і використанням хімічних речовин. Однак, для реалізації обґрунтованих способів і засобів зменшення вмісту домішок в атмосфері тупикових виробок необхідна розробка компактною спеціальної установки, що відрізняється далекобійністю дрібнодисперсних крапель і підвищеною ефективністю використання ВМП.

Нижче зупинимось на розробці конструкції пневмогідравлічної установки для пилогазоподавлення після підривання шпурів у вибої виробки. Ця установка повинна утворювати високодисперсний аерозоль (суміш), здатний нейтралізувати шкідливі гази і пил шляхом коагуляції,

розчинення і витіснення на вихідний вентиляційний струмінь, який протікає в наскрізній виробці. При цьому водоповітряна суміш повинна мати активовані властивості, які прискорюють коагуляцію пилу і нейтралізацію газів.

Аналіз способів розпилення рідини свідчить про перевагу пневматичного розпилювання перед механічним, яке полягає у наступному: отримання тонко дисперсної суміші; здатність переміщати дрібні краплі рідини на відстань більше 20 м. Крім того, вихідний струмінь за рахунок адіабатного розширення втрачає температуру, що сприяє охолодженню атмосфери в місці вибуху, конденсації вологи і коагуляції пилу.

Аналіз роботи пневматичних форсунок показав, що хороше диспергування забезпечується, якщо на 1 кг рідини витрачається 1 кг повітря, яке її розпорошує [6, 7]. Основними параметрами, що визначають режим роботи установки є: а) тиск рідини перед форсункою; б) швидкість повітря; в) співвідношення між ваговими витратами рідини і повітря. Пневмогідралічна установка ПГФВ наведена на рис. 1.

Рис. 1. Схема установки ПГФВ для очищення повітря після підривання шпурів: 1 – тупикова гірничавиробка (піднятцевий); 2 – вибій виробки; 3 – наскрізна виробка; 4 – трубопровід для подачі стисненого повітря; 5 – трубопровід для подачі води; 6 – вентиль; 7 – форсунка ПГФ-2; 8 – трубопровід для подання водоповітряної суміші у вибій; 9 – факел водоповітряної суміші; 10 – замірна станція

Провітрювання піднятцевого 1 здійснюється наступним чином. Після підривання шпурових зарядів у вибої 2 відкриваються вентилі 6, при цьому стиснене повітря (трубопровід 4) і вода (трубопровід 5) надходять в пневматичну форсунку 7, яка утворює водоповітряну суміш. Під тиском від пневматичної форсунки 7 водоповітряна суміш подається трубопроводом 8 до вибою

2 назустріч викиду вибухом забрудненого повітря. В обмеженому просторі вибоєю 2 відбувається взаємодія факелу водоповітряної суміші 9 з шкідливими домішками повітря, викинутого вибухом. Очищення забрудненого повітря у вибої тупикової виробки відбувається шляхом активної коагуляції аерозолів з пилом і нейтралізації отруйних газів в результаті їх адсорбції на субмікроскопічних краплях води. На виході з піднятцевого 1 в замірній станції 10 вимірюють вміст шкідливих домішок в повітрі, що витіснюється з вибоєю 2. Вимірювання здійснюють до поки їх вміст не знизиться до межі допустимої санітарними нормами. Після нормалізації атмосфери у піднятцевому 1 вентилі 6 закриваються, пневматична форсунка 7 перестає утворювати водоповітряну суміш.

Організація робіт і заходи безпеки. Для проведення піднятцевого 1 першочергово засікають нішу розміром: глибина – 2 м; ширина – 1,8 м; висота – 1,8 м. При проведенні піднятцевого висотою до 5 м від підлоги ніші, обладнання під буріння укріплюють шляхом установки на підлошві кострового кріплення (дерев'яного настилу). Подальше обладнання піднятцевого під буріння здійснюється шляхом установки розстрілів і драбин та настилу дерев'яних полків.

Після здійснення вибуху у піднятцевому відбувається його провітрювання за допомогою установки ПГФВ. Гірничий майстер здійснює експрес-аналіз повітря. Якщо виявлено наявність шкідливих газів (CO , NO_2) – провітрювання триває до повної нормалізації атмосфери. Підходити до піднятцевого дозволяється тільки після аналізу атмосфери по наскрізній виробці 3 з боку надходження свіжого повітря; при собі необхідно мати саморятувальник. Роботу у піднятцевому 1 дозволяється розпочинати при концентрації газів нижче ГДК. Прибирання відбитої гірської маси здійснюється після підривання шпурів з метою запобігання запечатування піднятцевого. Після проведення піднятцевого на висоту 7-9 м його обладнують люком для вивантаження відбитої породи у вагон. Всі роботи проводяться з дотриманням усіх необхідних заходів безпеки, які регламентуються відповідними нормативними документами. Відповідальний за безпеку змінний гірничий майстер.

Перед підриванням шпурів, підричник, зобов'язаний перевірити справність вентиляційної системи, правильність обмурювання вибою у відповідності із паспортом буро-підричних робіт (БПР). Перед початком заряджання шпурів підричник зобов'язаний виставити пости охорони і аншлаги згідно паспорту БПР. Подати звуковий сигнал – один довгий (попереджувальний), відключити електричну енергію. Заряджання здійснювати вручну за допомогою дерев'яної забійки. При виготовленні патрону-бойовика, заглиблення в патроні вибухової речовини для електродетонатора утворюють з використанням алюмінієвої наконечника. Зарядивши вибій і зібравши електричну мережу або хвильоводи, перед прокладанням магістралі, підричник розбирає дошки з полків, закріплює їх з одного боку на попереджувальний полок. Після заряджання і комутації підривної мережі, підричник з безпечного місця здійснює перевірку цілісності мережі і вмикає установку ПГФВ для пилогазоподавлення і провітрювання. У відповідності із графіком проведення підричних робіт, подає звуковий сигнал – два довгих (бойовий), здійснює вибух, відключає підривну машинку, а кінці підривної мережі закорочує і подає звуковий сигнал відбій (три коротких). Всі працівники, які не задіяні на підривних роботах повинні бути виведені з небезпечної зони та дотримуватися графіку ведіння підричних робіт.

Висновки та напрямок подальших досліджень.

1. Проведення піднятиєвих виробок відрізняється небезпекою травмування падаючими кусками породи, падінням з драбин і отруєнням шкідливими газами після підривання шпурів у вибоях.

2. Зрошення пилогазових викидів при підриванні шпурів у вибої не дозволяє очистити повітря від пилу і газів до санітарних норм, а засоби провітрювання руйнуються під час вибуху.

3. Використання водоповітряної суміші, як засобу поглинання пилу і нейтралізації шкідливих газів у вибоях після підривання шпурів дозволяє знизити їх концентрацію до ГДК за регламентований проміжок часу.

4. Застосування установки ПГФВ, яка утворює водоповітряну суміш, є прийнятним способом для боротьби з пилом і шкідливими газами при проведенні гірничих виробок в шахтах.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку заходів безпеки при проведенні піднятиєвих з використанням бурової автоматизованої технології.

Список літератури

1. Гагауз Ф. Г., Дребница А. В. Состав и количество ядовитых газов при ведении взрывных работ в подземных горных выработках // В сб. Взрывное дело. - М.: Недра, 1970. - № 68/25/. - С. 19-23.
2. Ярембаш И. Ф. Очистка рудничной атмосферы после взрывных работ. - М.: Недра, 1979. - 191 с.
3. Янов А. П., Ващенко В. С. Защита рудничной атмосферы от загрязнения. - М.: Недра, 1977. - С. 61-71.
4. Журавлев В. П., Саранчук В. И., Рекун В. В. и др. Моделирование и проектирование систем гидрообеспыливания. - К.: Наукова думка, 1990. - 120 с.
5. Орехова О. В. Професійний ризик розвитку захворювань при підземному добуванні залізної руди / Зб. наук. праць співр. НМАПО ім. П. Л. Шупіка. - 2017, № 27. - С. 457-464.
6. Лапшин О. О. Знешкодження отруйних газів і пилу в гірничих виробках шахт / О.О. Лапшин // Проблеми охорони праці в Україні. - 2002. - С. 35-39.
7. Лапшин А.Е. Уменьшение распространения пыли в атмосфере на промплощадках горных предприятий / А.Е. Лапшин // Разработка рудных месторождений. - 1995. - Вып. 56. - С. 128-137.
8. Аерология гірничих підприємств: підручник / А. О. Гурін, П. В. Бересневич, А. А. Немченко, І. Б. Ошмянський. - Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2007. - 462 с.
9. Лапшин А.А. Математическое моделирование процессов проветривания тупиковых выработок / Лапшин А.А., Серебренников Э.В. // Разработка рудных месторождений. - 2002. - Вып. 81. - С. 138-143.
10. Ошмянський І.Б. Настанова з проектування вентиляції рудних шахт / І.Б. Ошмянський, О.Є. Лапшин, О.О. Лапшин. - Кривий Ріг: ДП НДІБПГ, 2011. - С. 110.
11. Лапшин О. Є.. Охорона праці в гірництві / О. Є. Лапшин, О. О. Лапшин, Д. О. Лапшина. - Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2018. - 273 с.
12. Goodman, G.R., Pollock, D.E., Beck, T.W. A comparison of a directional spray system and a flooded-bed scrubber for controlling respirable dust exposures and facegas concentrations. Proceedings of the 10th U.S. / North American Mine Ventilation Symposium (Anchorage, AK, May 16-19, 2004), pp. 241-248.
13. Volkwein, J.C., Vinson, R.P., Page, S.J., McWilliams, L.J., Joy, G.J., Mischler, S.E., Tuchman, D.P. (2006) Laboratory and field performance of a continuously measuring personal respirable dust monitor. Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH). № 2006-145, RI 9669.
14. Chekan, G.J., Listak, J.M., Colinet, J.F. Laboratory testing to quantify dust entrainment during shield advance. Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress (Krakow, Poland, June 17-22, 2001), pp. 291-298

Рукопис подано до редакції 31.03.2021

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ ПРИ ХОЛОДНОМУ
ПРОКАТУВАННІ ТОНКИХ ЛИСТІВ**

Мета. Дослідити витрати енергії при холодному прокатуванні тонких сталевих листів і скласти енергетичний баланс процесу. Сучасний розвиток прокатного виробництва пов'язаний з раціональним використанням енергетичних ресурсів. Технологія виготовлення тонких листів, які в подальшому використовуються в машинобудуванні та будівництві, постійно удосконалюється з метою підвищення продуктивності устаткування, поліпшення якості виробів і зменшення собівартості процесу. При розробці нових технологічних процесів велика увага приділяється енергозбереженню, тому дослідити витрати енергії при холодному прокатуванні тонких листів і скласти енергетичний баланс процесу є задачею актуальною, вирішення якої дозволить контролювати витрати енергії на прокатування.

Методи дослідження базуються на використанні фундаментальних положень теорії обробки металів тиском і розрахункових методів визначення енергосилових параметрів прокатування.

Наукова новизна полягає у тому, що при дослідженні енергетичних складових процесу холодного прокатування було виявлено прихід надлишкової енергії в осередок деформації.

Практична значимість роботи полягає у встановленні раціональних режимів обробки, що дозволяють зменшити витрати енергії на прокатування тонких листів.

Результати. Було детально досліджено осередок деформації при холодному прокатуванні. Встановлено прихідні статті енергетичного балансу й енергетичні витрати в осередку деформації на перетворення енергії в кінетичну енергію розкату, нагрівання металу при обробці, потенційну енергію утворення нової поверхні, роботу деформації. При дослідженні враховувались опір матеріалу пластичній деформації та його зміни при холодному обтисненні. Було запропоновано оновлену методику розрахунку енергетичного балансу осередку деформації при холодному прокатуванні тонких листів та перевірено збалансування розрахованого енергетичного балансу. Розрахунки показали, що при прокатуванні тонкого листа при кімнатній температурі енергія перетворюється в теплоту та витрачається на зміцнення металу. Збалансувати прихід і витрати енергії можна збільшенням температури в осередку деформації. При цьому зростає тепловміст металу без зростання його міцності у випадку холодного прокатування.

Ключові слова: осередок деформації, холодне прокатування, тонкий лист, кінетична енергія, потенційна енергія, енергетичний баланс.

doi: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-56-61

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Велику частку металовиробів, що використовуються в машинобудуванні, будівництві, транспорті, авіації та інших галузях, складає листопрокатна продукція, до якої пред'являються високі вимоги за точністю розмірів і якості внутрішнього шару при мінімальній собівартості.

Подальший розвиток листопрокатного виробництва пов'язаний з використанням нових передових технологій, що забезпечують раціональне використання енергетичних ресурсів. У зв'язку з цим пропонується дослідити витрати енергії на процес холодного прокатування тонких листів з метою оцінки витрат енергії в залежності від режимів обтиснення. Це дозволить визначати раціональні режими обтиснення при роботі прокатних станів, що підтверджує актуальність даної статті.

Аналіз досліджень і публікацій. При підвищенні ефективності металургійного виробництва особлива увага приділяється поліпшенню якості металовиробів [1] і зменшенню енерговитрат при прокатуванні. Одним з головних напрямів розвитку листопрокатного виробництва в Україні є створення прогресивних технологій, що дозволяють зменшити витрати енергії, підвищити якість та конкурентоспроможність продукції, що випускається.

Тонкий лист виготовляється холодним прокатуванням з гарячекатаних листів. Введення в експлуатацію на металургійних підприємствах високошвидкісних прокатних станів ставить питання про необхідність розробки нових і удосконалення існуючих режимів холодного прокатування [2] тонких листів [3].

Листопрокатне виробництво є доволі матеріалоемним і не може часто виконувати масштабне технічне переозброєння, тому нові технологічні процеси повинні базуватися на глибоких знаннях про досліджуваний об'єкт. Поглиблені уявлення про процеси листопрокатного виробництва дозволяють надати достовірну кількісну й якісну оцінку тим явищам, що мають

місце в осередку деформації при обробці тиском, і на їх основі створювати ресурсо- та енергозберігаючі технології.

Важливою умовою розвитку теорії та технології листопрокатного виробництва є виявлення фізичних закономірностей в поведінці деформуємого металу, враховуючи його контактну взаємодію з прокатними валками, та розробка нових методів розрахунку технологічних параметрів, які мають істотний вплив на витрати енергії при прокатуванні [4, 5].

Теорія і технологія листопрокатного виробництва на сьогоднішній день досягли суттєвих результатів у підвищенні продуктивності устаткування й якості готової продукції. Але методи, що використовуються в розрахунках енергосилових параметрів, мають безліч умовностей і припущень, існує декілька спрощень в кінематичних розрахунках, які зменшують точність важливих обчислень. Тому потрібно застосувати новий підхід до розрахунків енергосилових параметрів, виявити закономірності зміни деформаційних і кінематичних чинників в осередку деформації при холодному прокатуванні тонких листів.

При прокатуванні листів відбувається обтиснення металу за висотою. При цьому здійснюється подовження і розширення металу. Під час прокатування утворюється осередок деформації, параметри якого наведено на рис. 1.

Вважається [2], що між лініями M і N знаходиться дійсний осередок деформації, а між лініями AA' і BB' – геометричний осередок деформації. На утворення осередка деформації витрачається велика кількість енергії [6, 7]. Аналіз літературних джерел [5-7] показав, що для забезпечення раціональних витрат енергії потрібно детально розглянути ці витрати за окремими статтями і скласти енергетичний баланс.

Мета статті – дослідити витрати енергії при холодному прокатуванні тонких листів і розрахувати енергетичний баланс.

Викладення матеріалу та результати. Використовуючи інформацію про те, що на вході в осередок деформації відбувається інтенсивне зменшення границі текучості матеріалу внаслідок роботи деформації і виділення тепла в осередку деформації, під впливом швидкості та ступеня деформації метал зміцнюється [8, 9]. Щоб здійснити його розширення і подовження, необхідно збільшити зусилля валків. Для визначення рівноважної температури металу в осередку деформації, при якій сталь витікатиме з осередку деформації без збільшення зусиль валків, складемо енергетичний баланс осередку деформації [9].

Теплота розкату [10], кДж/с

$$Q_{oo}^{pb} = \xi \rho_b^{tb}, \quad (1)$$

де i_b^{tb} – тепловміст матеріалу розкату при температурі виходу з валків; ρ – густина сталі, $\rho=7750$ кг/м³; ξ – об'ємна продуктивність, м³/с.

Прирівнявши за законом збереження енергії суму приходних статей до суми витратних статей енергетичного балансу і прийнявши, що метал входить в осередок деформації при кімнатній температурі та з відповідною границею текучості, а виходить з осередку деформації при більшій температурі та з меншою границею текучості внаслідок виділення тепла за рахунок роботи деформації, можна визначити методом наближення температуру металу, яку він набуває при прокатуванні.

Використавши рівняння (1), визначили температуру сталі на виході з осередку деформації. Результати розрахунків зведено в табл. 1; параметри режимів взято з джерела [9].

Рис. 1. Схема осередку деформації: $ABB'A'$ – осередок деформації; h_0 – початкова товщина листа; h_1 – товщина листа після деформації; R – радіус прокатних валків; F_k – площа контакту листа з прокатними валками; α – кут захоплення; b_0 – ширина смуги до прокатування; b_1 – ширина смуги після прокатування; L_d – довжина осередку деформації; M – течія металу до входу в осередок деформації, N – течія металу на виході з осередку деформації [2]

Як бачимо з табл. 1, результати визначення температури листа на виході з валків, виконані за рівнянням енергетичного балансу осередку деформації, підтверджують зміну границі текучості, визначену методом наближення до рівності приходу і витрати суми енергій.

Однією з приходних статей енергетичного балансу осередку деформації є енергія заготовки перед входом у валки, що складається з тепловмісту, кінетичної та потенційної енергії заготовки [6, 11, 12]. Кінетична енергія як заготовки, так і розкату характеризується їхньою масою та швидкістю. Потенційна енергія і заготовки, і розкату представлена поверхневою енергією та міцністю.

Таблиця 1

Результати визначення зміни границі текучості сталі

Температура заготовки, $t_{пр}$, °C	Колова швидкість поверхні валків, v_b , м/с	Границя текучості сталі, кДж/кг	Ступінь деформації, %	Швидкість деформації, c^{-1}	Температура розкату, t_b , °C	Зміна температури в осередку деформації, Δt_b , °C	Границя текучості сталі при виході з валків, кДж/кг	Зміна границі текучості в осередку деформації, кДж/кг
50	20	2,57	8	$0,77 \cdot 10^6$	376	329	1,98	-0,59
100	15	2,48	12	$1,4 \cdot 10^6$	786	686	1,26	-1,22

Зауважимо, що сталій процес прокатування розпочинається після утворення осередку деформації, тобто виділена питома довжина заготовки $l_0 = 1$ м уже має передісторію довжиною $R \sin \alpha$, де 2α – кут між дотичними в симетричних точках контакту нижнього і верхнього валків у мить утворення осередку деформації, а α – кут захвату, як його розуміють в теорії повздовжньої прокатки [2, 11, 12]. Після захвату лінійна швидкість руху заготовки в напрямку прокатування дорівнює коловій швидкості валків v_b . З такою ж швидкістю рухається і осередок деформації в напрямку, протилежному напрямку прокатування [13].

Одночасно з входом заготовки (її переднього краю) в міжвалковий робочий простір, тобто в осередок деформації здійснюється симетричне двобічне стиснення металу. Це стиснення при сталому режимі прокатування можна вважати адіабатичним, враховуючи малу тривалість перебування металу в осередку деформації, що сприяє збільшенню пластичності, тобто текучості та зменшенню в'язкості металу внаслідок виділення тепла при виконанні роботи його деформації. Згідно з нашою концепцією розгляду вмісту осередку деформації як високов'язкої рідини вважаємо, що в об'ємі цього осередку деформації діє закон Паскаля, тобто тиск, створюваний валками на поверхню заготовки при вході в осередок деформації миттєво (зі швидкістю звуку) розповсюджується по всьому деформованому об'єму. Такі умови створюють можливість витікання металу в розширення і в подовження, а в калібрах – тільки в подовження. Саме нормальні напруження, віднесені до площі контактної поверхні між валками і розкатом, утворюють силу, яка виконує роботу деформації розкату. Дотичні ж напруження в контактній міжвалковій поверхні, віднесені до площі цієї поверхні та направлені проти руху валків і напрямку прокатки, формують силу, яка забезпечує швидкість розкату – продуктивність кліті.

Можна по-різному розуміти головну роль сил в осередку деформації: без тягучої сили тертя не може бути прокатування, але без сили тиску немає сили тертя і також не може бути прокатування. Проте все ж очевидно, що радіальна сила тиску валків на штабу за своєю природою є тільки силою, яка потрібна і достатня для здійснення пластичної деформації розкату, тобто є деформуючою силою. Ця сила визначається, насамперед, здатністю тіла чинити опір пластичній деформації в цих умовах, тобто тиском металу на валки, і, звичайно, площею контактної поверхні розкату з валками.

Ця сила є деформуючою, а будь-яка деформація супроводжується витратою енергії. Отже, на певному шляху і при певній швидкості вона здатна здійснити і здійснює той мінімум роботи, який потрібний і достатній для забезпечення заданої деформації розкату за один прохід. Те, що ця сила тиску валків на штабу відносно до валків спрямована радіально, не має ніякого значення відносно до розкату. Важливо лише, що ця сила перпендикулярна до напрямку руху розкату, оскільки лише в цьому разі теоретична сила не здійснює роботи.

Отже робота сили деформації полягає в створенні в осередку деформації тиску – напруження, дещо більшого напруження текучості $\sigma_{0,2T}$, внаслідок чого метал витікає з осередку деформації в розширення і подовження. Загалом сила деформації складається як рівнодіюча

напруження текучості та 20% відносної деформації при обтисненні. Рівнодіюча свою роботу виконує на відстані, яка дорівнює величині обтиснення $\Delta h = h_0 - h_1$. При контактній взаємодії металу та валків утворюється площа контактної поверхні, що обмежує осередок деформації [14, 15]. В процесі прокатування вона змінюється. Рівнодіюча сили напруження і сили нормального тиску на валки завжди цікавила прокатників-вчених. Тому загальновідомі класичні залежності А.А. Дінника [16], С.І. Губкіна [17], М.А. Зайкова [18] і багатьох інших, які дозволяють розраховувати опір деформації, враховуючи температуру, ступінь і швидкість деформації за формулою множинної кореляційної залежності між названими параметрами.

Маючи теоретичну основу енергетичного балансу осередку деформації, розрахуємо прихідні статті балансу для досліджуваних режимів прокатування тонких листів. До приходних статей балансу відносяться: фізичне тепло заготовки, механічна енергія валків і потенційна енергія зовнішньої поверхні та її міцності.

Щосекундний прихід теплової енергії в осередок деформації

$$Q_{od}^{nt} = \frac{i_t \rho_m V_{od}}{\tau_{od}}, \quad (2)$$

де i_t – тепловміст сталі, кДж/кг; ρ_m – густина сталі, кг/м³; V_{od} – об'єм осередку деформації, м³; τ_{od} – час перебування металу в осередку деформації.

Кінетична енергія валків надходить в осередок деформації через контактну поверхню протягом перебування металу в осередку

$$W_{od}^{nt} = \sigma_T^t R \frac{b_0 + b_1}{2} v_b \sin \alpha, \quad (3)$$

де b_0 , b_1 – початкова ширина заготовки (осередку деформації) і розкату (кінцева ширина осередку деформації), м; R – радіус валків, м; α – кут захвату; σ_T^t – границя текучості при відповідній температурі.

Прихід потенційної енергії в осередок деформації у вигляді енергії зовнішньої поверхні, кДж/с

$$E_{nn}^{nt} = 2(b_0 + h_0) v_0 \sigma_{nn}^t, \quad (4)$$

де σ_{nn}^t – поверхнева енергія металу, що представляє суму поверхневого натягу та теплової енергії, витраченої на створення нової поверхні при незмінній сумі загальної поверхневої енергії твердого тіла; v_0 – швидкість прокатування на вході в осередок деформації.

Прихід потенційної енергії в осередок деформації у вигляді міцності металу:

$$E_{nmm}^t = \frac{V_{od}}{\tau_{od}} \cdot \frac{\sigma_T^t}{102}, \quad (5)$$

де 102 – коефіцієнт переводу кг·м в кДж.

Сумарний прихід енергії в осередок деформації, кДж/с

$$\sum E_{od}^{nt} = Q_{od}^{nt} + W_{od}^{nt} + E_{nn}^{nt} + E_{nmm}^t \quad (6)$$

До витратних статей енергетичного балансу осередку деформації відносяться: кінетична енергія розкату, потенційна енергія новоутвореної поверхні металу та міцності, робота деформації металу і фізичне тепло розкату.

Кінетична енергія розкату, кДж/с

$$E_{odn}^{bt} = \frac{m v_1^2}{2q102} = \frac{\rho b_1 h_1 v_1^3}{2 \cdot 9,81 \cdot 102}, \quad (7)$$

де m – масова продуктивність осередку деформації, кг/с; v_1 – швидкість розкату, м/с.

Втрати потенційної енергії з осередку деформації у вигляді новоутвореної поверхні

$$E_{nn}^{bt} = 2(b_1 + h_1) v_1 \cdot \sigma_{nn}^t. \quad (8)$$

Витрати енергії на зміцнення металу

$$E_{nmm}^{bt} = \frac{V_{od}}{\tau_{od}} \sigma_T^t. \quad (9)$$

Робота деформації металу обчислюється з урахуванням, що в осередку деформації метал обтискується, розширюється та подовжується

$$A_{od}^{bt} = \sigma_T \left(\frac{\Delta h}{h_0} + \frac{\Delta b}{b_0} + \frac{\Delta l}{l_0} \right) \frac{b_{cp} h_{cp} R \sin \alpha}{102 \tau_{od}}, \quad (10)$$

де Δl – подовження смуги, $\Delta l = l_1 - l_0$, l_1 – кінцева довжина смуги; b_{cp} – середня ширина смуги, $b_{cp} = (b_1 + b_0)/2$; h_{cp} – середня товщина смуги, $h_{cp} = (h_1 + h_0)/2$.

Сумарні витрати енергії в осередку деформації, кДж/с

$$\sum E_{od}^{bt} = Q_{od}^{pb} + E_{odn}^{bt} + E_{nn}^{bt} + E_{nmm}^{bt} + A_{od}^{bt}. \quad (11)$$

У табл. 2 зведено основні параметри прокатування в характерних випадках, що використувались у дослідженнях.

Таблиця 2

Параметри прокатування в характерних випадках

α , град	h_0 , мм	h_1 , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	t_{np} , °C	l_1 , м	$V_{od} \cdot 10^{-6}$	$\tau \cdot 10^{-6}$, с	V_{od}/τ , м ³ /с
2,4	2	1,92	1000	1010	50	1030	0,0052	0,13	0,04
6,0	5	4,7	1000	1020	100	1040	0,0546	0,728	0,075

При врахуванні впливу ступеня деформації, температури і швидкості деформації на границю текучості сталі розрахунок енергетичного балансу (табл. 3) показав, що під час холодного прокатування прихід енергії перевищує його витрати. Це ще раз підтверджує, що збалансування відбувається за рахунок підвищення температури в осередку деформації.

Вважаючи температуру величиною статичною, можна допустити наявність прошарків чи об'ємів розміром рідинних кластерів, товщиною в декілька атомів, маючих температуру, яка суттєво перевищує середню температуру осередку деформації та забезпечує плин металу при збільшеному опорі внаслідок наклепу.

Таблиця 3

Енергетичний баланс осередку деформації

Статті балансу										
Прихід енергії, кДж/с					Витрати енергії, кДж/с					
теплота заготов-ки	меха-нічна енер-гія валків	потен-ційна енергія зовніш-ньої по-верхні	потен-ційна енергія міцності металу	всьо-го	тепло-та розка-ту	кінети-чна енергія розкату	потенційна енергія ново-утвореної поверхні	потен-ційна енергія міцності металу	робота дефор-мації металу	всьо-го
3104	15038	156	11882	30180	7692	67	162	11884	8862	28667
29062	46717	115	21448	97342	33940	92	122	21544	24024	79722

Як видно з порівняння сумарних значень приходу та витрат енергії в осередку деформації при температурі заготовки (табл. 3), прихід перевищує витрати енергії в процесах прокатування. Збалансувати прихід та витрати енергії можна збільшенням температури в осередку деформації; при цьому зростає тепловміст металу без зростання його міцності у випадку холодного прокатування. Повний енергетичний баланс осередку деформації можна отримати, врахувавши залежність границі текучості від ступеню, температури та швидкості деформації.

Висновки та напрямки подальших досліджень. У статті запропоновано оновлену методу для визначення витрат енергії на прокатування; встановлено раціональні режими, які дозволяють зменшити витрати енергії при прокатуванні; визначено кількість енергії, що надійшла до осередку деформації та складається з теплоти заготовки, механічної енергії валків, потенційної енергії поверхневого натягу металу, а також витрати енергії, що складаються з теплоти розкату, кінетичної енергії розкату, потенційної енергії зовнішньої поверхні та міцності металу і роботи деформації; розраховано енергетичний баланс осередку деформації, який показав, що під час холодного прокатування прихід енергії перевищує його витрати. Це ще раз підтвердило, що збалансування відбувається за рахунок підвищення температури в осередку деформації.

У подальшому аналогічні розрахунки планується виконати для прокатування сортових профілів.

Список літератури

1. Zhbanova O. M., Saithareyev L. N., Skidin I. E., Shapovalova N. N., Gubin G. G Investigation of the influence of electro-impulse current on manganiferous liquid-alloy. Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018, Sumy, Ukraine. P. 207-213 https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_22.
2. Василев Я. Д. Теорія позовжної прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Підручник. – Донецьк: УНІ-ТЕХ, 2009. – 488 с.
3. Чубенко В. А. Визначення впливу режиму обтиснення при прокатуванні на внутрішню будову металу / В. А. Чубенко, А. А. Хіноцька // Качество минерального сырья. Сб. научн. тр., Т2, Кривой Рог: Изд. центр ГВУЗ «КНУ», 2018 – С.151-159.
4. Дослідження об'ємноструктурних і енергетичних перетворень в сталях при прокатуванні. Монографія / В. А. Чубенко, А. А. Хіноцька, – Кривий Ріг: Видавництво (ФОП Чернявський Д.О.), 2018. – 178 с.
5. Оптимізація процесу налаштування безперервної листової прокатки / В. С. Єгоров, О. П. Єгоров, О. Ю. Потап та інші. // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2016, № 1. – С. 106-109.
6. Максименко О. П. Теоретический анализ влияния натяжений на энергозатраты и устойчивость процесса прокатки / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко // Вісник «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХП», – 2013. – № 42 (1015). – С. 119-125.
7. Скляр В. О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии. Учебное пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – 224 с.
8. Бережний М. М. Енергетичний баланс осередку деформації при прокатуванні / М. М. Бережний, А. А. Хіноцька, В. А. Чубенко // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: вид – во СЛУ ім. В. Даля, 2012. – С. 60 – 67.
9. Час перебування металу в осередку деформації та утворення нової поверхні / [Бережний М. М., Чубенко В. А., Хіноцька А. А., Глінкин А. В.] // Вісник КНУ. – Вип. 30. – 2012. – ст. 171 – 174.
10. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
11. Коновалов Ю. В. Пути решения температурной задачи прокатки / Ю. В. Коновалов, А. С. Хохлов // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. 2012. – № 2 (31). – С. 185-188.
12. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / П. И. Полухин, В. А. Никоваев и др. – М.: Металлургия, 1974. – 199 с.
13. Старченко Д. И. К расчету давления металла на валки / Старченко Д. И., Резниченко Е. И. // Известия АН СССР. Металлы. – 1985. – № 4. – С.80-88.
14. Коновалов Ю. В. Справочник прокатника. / Ю. В. Коновалов. – Справочн. изд-е в 2-х книгах. – Книга 1. – Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2009. – 640 с.
15. Огинский И. К. Силовая картина в очаге деформации при установившемся процессе прокатки / И. К. Огинский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 1. – С. 37-40.
16. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин – М.: Металлургиздат, 1947. – 360 с.
17. Владимиров В. В. Физическая природа разрушения металлов // В. И. Владимиров. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
18. Зайков М. А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке / Зайков М. А. – М.: Металлургиздат, 1960. – 286 с.

Рукопис подано до редакції 02.04.2021

УДК 622.274.3

С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд.техн.наук
Криворізький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ СИСТЕМАМИ ПІДПОВЕРХОВОГО ОБВАЛЕННЯ РУДИ ТА ВМІЩУЮЧИХ ПОРІД

Мета. Метою виконаних досліджень є удосконалення технології розробки залізорудних родовищ системами підповерхового обвалення руди та вміщуючих порід, яка дозволить підвищити кількість видобутої рудної маси при наявності нестійких порід всіячого боку.

Методи дослідження. При видобутку багатих залізних руд Криворізького залізорудного басейну застосовують системи розробки з відкритим очисним простором та з обваленням порід, які дозволили підвищити вміст заліза в видобутій рудній масі на 0,5–1,5%. Основним недоліком даних систем розробки є обмежені умови застосування. Так, наявність зі сторони всіячого боку нестійких порід суттєво погіршують показники вилучення. Запропонований варіант системи розробки з переуцільненим шаром руди у всіячого боку виключає проникнення пустих порід в очисний блок, що відпрацьовується. Однак, при визначенні ширини переуцільненого шару не враховуються фізико-механічні властивості гірських порід. Так, при відпрацюванні блоку в нестійких породах ширина цілика у всіячого