

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

М.Т. Бакка, Є.В. Скочко

ЖОРСТКІСТЬ І СТІЙКІСТЬ ШТРИПСОВИХ ПИЛ
ПРИ РОЗПИЛЮВАННІ КАМЕНЮ

В статті розглянуті деякі фізичні явища, пов'язані зі стійкістю штрипсових пил при розпилюванні каменю. Наведено пояснення впливу стійкості пил на точність і продуктивність розпилювання.

При розпилюванні кам'яних блоків на плити на штрипсових рамних розпилювальних верстатах від дії незначного поперечного навантаження, яке проходить через центри вигину січень штрипсових пил, виникає їх "чистий" поперечний вигин. Проте, при досягненні навантаженням деякого критичного значення $P_{кр}$, ця вигнута форма рівноваги перестає бути сталою і виникає нова форма збуреної рівноваги, яка характеризується закручуванням середньої частини штрипсових пил. Такий вид втрати стійкості пил зветься перекиданням. При перекиданні штрипсова пила закручується, а її вісь вигинається в площині найменшої жорсткості.

Штрипсові пили, які двома кінцями установлені на пилорамі верстата, з точки зору науки про опір матеріалів, при відносно малій товщині ($b = 2, \dots 8$ мм), великій висоті ($h = 100, \dots 200$ мм) і значній довжині ($l = 2000, \dots 6000$ мм) є тонкостінними стержнями з відкритим профілем, яким характерна відносно невелика жорсткість на кручення.

Так, жорсткість вільного кручення визначиться:

$$C = G \cdot J_k, \quad (1)$$

де G – модуль пружності другого роду (модуль зсуву), який для матеріалу штрипсових пил – сталі 65Г – $G = 8 \cdot 10^4$ МПа = $8 \cdot 10^6$ Н/см²;

J_k – момент інерції поперечного прямокутного січення штрипсової пили при вільному крученні [1]:

$$J_k = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{b} - 0,63 \right) \cdot b^4.$$

При $h = 18$ см, $b = 0,6$ см

$$J_k = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{18}{0,6} - 0,63 \right) \cdot 0,6^4 = 1,2688 \text{ см}^4.$$

Тоді жорсткість вільного кручення штрипсової пили визначиться:

$$C = 8 \cdot 10^6 \cdot 1,2688 = 1,015 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{см}^2 = 10,15 \text{ МН} \cdot \text{см}^2.$$

Ця величина значно менша, ніж, наприклад, для бруса замкнутого профілю – тонкостінної труби того ж поперечного січення.

Дослідження форми і розмірів нижніх залишків блоків (так званих недопилів) показало підтвердження вказаних теоретичних гіпотез. Так, при розпилюванні блоків з довжиною порядку 1000 мм при більш, ніж 100 вимірах одержані усереднені розміри найбільших (посередині довжини) стрілок вигину пропилів, рівних $\delta = 19 \pm 8$ мм. Великий розкид відповідних величин вигину штрипсових пил може бути пояснений, по-перше, різним їх поздовжнім натягненням, а по-друге, різною величиною залишеної висоти їх живої січення. Нижні частини пропилів у поперечному січенні недопилів мають не прямокутну, а клинову форму, яка звужується до дна пропилу, з округленням останнього по дузі, близького до частини кола.

Спостереження проводились при розпилюванні блоків штрипсовими пилами товщиною 6 мм. В процесі зносу пил висота їх живої частини зменшувалась до 80 ... 100 мм, а товщина нижньої (робочої) частини знижувалась до 4,5 ... 5 мм. Розміри ширини пропилів, які вимірювались на базовій їх глибині, рівній 100 мм, відрізнялись на (10 ... 12)–(8 ... 9)–(2 ... 3) мм, що підтверджує гіпотезу про закручування штрипсових пил в середній їх частині. Підтверджує цю гіпотезу також і підвищений знос верхніх бокових неробочих поверхонь штрипсових пил, де їх товщина зменшується на 0,3 ... 0,8 мм.

Питання про направлення перекидання (вліво чи вправо) штрипсової пили визначається сукупністю таких факторів:

- початковою неплосцинністю (гвинтоподібністю) штрипсових пил;
- початковим відхиленням від перпендикулярності штрипсової пили відносно запилюваної поверхні блоку;
- невідповідністю положення штрипсової пили і напрямку її відносного руху;
- несиметричністю положення штрипсової пили і пропилу;
- відхиленням від поздовжнього положення кінців пил в штрипсотримачах та роздільниках;
- наявністю поперечних коливань пилорами в процесі розпилювання блоків.

Вірогідно, що перекидання деяких пил виникає по два рази за один подвійний хід пилорами на незначну величину тільки при їх малому зносі та значному натягненні (до 20 ... 80 кН), а також при незначних поперечних похибках їх положень та руху (до 0,2 ... 0,6 мм). Для штрипсових пил, які мають менший натяг та більшу похибку поперечних положень (а таких більшість), зміна напрямку перекидання виникає рідше, або взагалі не має місця. Розвитком цього процесу одностороннього перекидання штрипсових пил є одностороннє закриття пропилу, що призводить до обмеження постачання його свіжою пульпою з дробом і подальшого поступового зміщення пропилу в поперечному напрямку. Результатом цього є підвищена неплосцинність та значна зміна товщин розпиленних плит, що призводить до підвищення браку та суттєвому збільшенню трудомісткості наступних шліфувально-полірувальних операцій.

Спочатку розглянемо аналітичні залежності без врахування явища перекидання для визначення величини повного найбільшого вигину штрипсової пили як двоопорної балки з шарнірно-опертими кінцями, на яку одночасно діє на її середині вертикальна поперечна сила P та поздовжня розтягуюча сила S .

Повний вигинаючий балку момент визначиться:

$$M = \frac{P \cdot l}{2} - S \cdot y,$$

де l – довжина балки;
 y – повний вигин балки.

Наближене диференціальне рівняння пружної лінії – осі балки запишеться

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{P \cdot l}{2 \cdot E \cdot J} = \frac{S \cdot y}{E \cdot J}, \text{ або } \frac{d^2(y - y_0)}{dx^2} = \frac{S \cdot y}{E \cdot J},$$

де y_0 – вигин балки тільки від дії поперечної сили P ;

x – поздовжня вісь балки;

E – модуль пружності матеріалу балки I роду;

J – момент інерції поперечного січення балки (для штрипсової пили – найбільший).

Якщо апроксимувати напівперіодом синусоїди пружну лінію осі балки, то після перетворень одержимо залежність для визначення повного вигину балки на її середині:

$$y = \frac{y_0}{1 + \frac{S \cdot l^2}{\pi^2 \cdot E \cdot J}} = \frac{y_0}{1 + \frac{S}{P_e}}, \quad (2)$$

де y_0 – найбільший вигин балки від дії тільки поперечної сили

$$y_0 = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J},$$

P_e – ейлерова сила

$$P_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{l^2}.$$

Як видно з формули, повний вигин y штрипсової пили від одночасної дії однакових за величиною поперечної сили P та розтягуючої сили S буде вдвічі менше деформації y_0 від дії тільки поперечної сили P .

При умові поперечної дії рівномірно-розподіленого навантаження інтенсивності q на штрипсову пилу як двоопорну, шарнірно закріплену балку, а також розтягуючої сили S , найбільша стріла вигину визначиться [2]:

$$y = \frac{\frac{4}{\pi^5} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J}}{1 + \frac{S \cdot l^2}{\pi^2 \cdot E \cdot J}} = \frac{y_0}{1 + \frac{S}{P_e}}, \quad (3)$$

де y_0 – найбільший вигин балки (пили) тільки від дії поперечного навантаження.

Зрозуміло, що в умовах закріплення штрипсових пил в досить жорсткій рамі не може не існувати взаємозв'язку між вертикальною поперечною силою P та поздовжньою силою. Дія сили P перетворює деяку початкову силу розтягнення S_0 в кінцеву силу S .

Додаткова сила $(S - S_0)$ може бути розрахована таким чином. У зв'язку з шарнірним з'єднанням штрипсової пили з жорсткою, незмінної довжини рамою, її можна уподібнити гнучкій нитці. Відомо [1], що кути повороту кінцевих січень двоопорної закріпленої шарнірно балки від навантаження посередині її поперечною силою P визначаються:

$$\Theta = \frac{P \cdot l^2}{6 \cdot E \cdot J} \cdot \left[\frac{l/2}{l} - \frac{(l/2)^3}{l^3} \right] = \frac{P \cdot l^2}{16 \cdot E \cdot J} \quad (4)$$

Якщо розкласти дотичну до пружної осі балки силу на її кінцях на вертикальну $P/2$ і горизонтальну $(S - S_0)$ її складові, то одержимо:

$$(S - S_0) = \frac{P \cdot \text{ctg}(\Theta)}{2} \quad (5)$$

З формули видно, що додаткова поздовжня сила $(S - S_0)$, яка виникає від дії поперечної сили P , досить значна. Але вже на початку роботи, ще при перших рухах притиснутої до блоку каменя штрипсової пили, яка має сім або більше елементів (одна пила, два пальці, два штрипсотримачі, два клини) та десять стиків між ними, що в результаті визначає обмежену жорсткість всього вказаного ланцюга, початкова сила S_0 розтягнення пили суттєво зменшується. В той же час кінцева поздовжня сила зменшується незначно. Така деяка стабілізація сили S має місце внаслідок двох одночасних поточних компенсуючих деформацій штрипсової пили – вигинальної (по висоті пропилу) та перекидної крутильної (поперек пропилу), а також часткового зростання величини поперечної сили P (внаслідок збільшення довжини миттєвого контакту деформованої пили з дном пропилу). Остання ситуація зводить нанівець переваги удосконалених конструкцій верстатів з опуклою траєкторією руху пилорами [3] і призводить до значного зниження тиску в зоні контакту пили, а внаслідок цього і до зменшення продуктивності розпили.

Використання роздільників між сусідніми пилами та попереднє стискання їх дозволяє зменшити рухомість кінців пил – поперечне зміщення і поворот навколо вертикальної та горизонтальної осей і в результаті підвищити опір явищу перекидання (закручування) пил.

Критичні значення поперечних навантажень, які призводять до закручування середніх частин штрипсових пил і надмірного поперечного вигину в площині найменшої жорсткості, можна приблизно визначити енергетичним методом [4]. Так, для двоопорної шарнірнозакріпленої, розтягнутої силою S , штрипсової пили значення критичної поперечної сили $P_{кр}$ визначиться:

$$P_{кр} = \frac{\kappa \cdot \sqrt{B_y \cdot C}}{l^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{S \cdot l^2}{\pi \cdot B_y}} \quad (6)$$

де $B_y = E \cdot J_y$ – жорсткість при вигині в площині найменшого опору;

$C = G \cdot J_k$ – жорсткість вільного кручення пили;

l – довжина штрипсової пили.

Розрахунок величини критичного поперечного навантаження за формулою (6) для сили $P_{кр}$, прикладеної посередині пили ($\kappa = 267$), а також для рівномірно розподіленого навантаження ($\kappa = 486$) при наведених на початку статті умовах, дозволив побудувати графік впливу (рис. 1) поздовжньої сили S на величину критичної сили $P_{кр}$ або $(q \cdot l)_{кр}$ (рис. 1).

Зрозуміло, що найбільша величина розтягуючої пилу сили S повинна бути обмежена міцністю найбільш слабого елемента або стику ланцюга всього конструктивного кріплення пили.

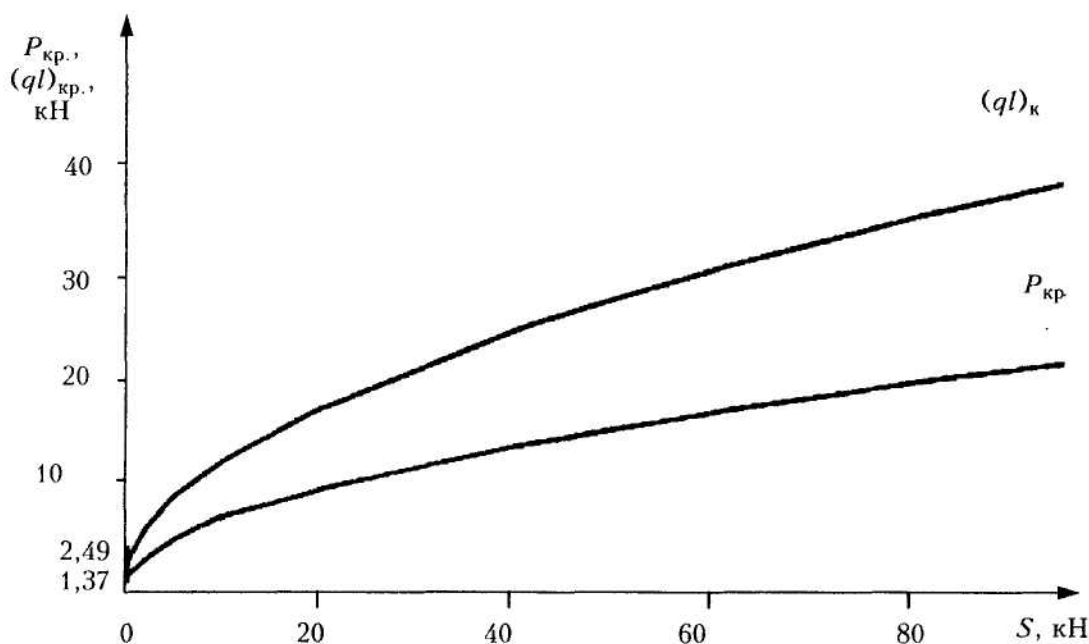


Рис. 1. Графік впливу поздовжньої розтягуючої сили на величину критичної сили $P_{кр}$ або $(ql)_{кр}$ подачі

Таким чином, небезпечне явище перекидання навіть деяких штрипових пил в усій пилорамі створює додаткове тертя пили в пропилах, що призводить до надмірного зносу пил, додаткових витрат енергії, погіршення якості заготовок плит та зменшення продуктивності розпилю. А тому цілком працездатними слід визнати тільки прогресивні конструкції верстатів з опуклою траєкторією руху пилорам та автоматичним, найбільш можливим натяжінням, або ж конструкції з вирівнюванням натяжіння на усіх штрипових пилах, що зберігають зусилля натяжіння найбільш можливий час.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Справочник по сопротивлению материалов / Отв. редактор Г.С. Писаренко / Изд-е 2-е перераб. и доп. – К.: Наукова думка, 1988. – 736 с.
2. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
3. Сычев Ю.И. и др. Оборудование для распиловки камня. – Л.: Стройиздат, 1983. – 286 с.
4. Прочность, устойчивость, колебания. Том 3 / Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 567 с.

БАККА Микола Терентійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геотехнології та обробки каменю Житомирського інженерно-технологічного інституту, ведучий спеціаліст у галузі каменевидобутку та каменеобробки.

Наукові інтереси:

– гірництво, екологія.

СКОЧКО Євген Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Металорізальні верстати і системи."

Наукові інтереси:

– обробка металів і каменю, системний аналіз.