

BADANIA MODELOWE ORAZ IN SITU KAMERAMI DO ZDJĘĆ SZYBKICH
I ULTRASZYBKICH NAD ROZSADZANIEM MASYWÓW SKALNYCH

Mieczysław Hobler

Instytut Projektowania i Budowy Kopalń
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

WSTĘP

Ostatnio coraz powszechniej stosuje się roboty strzelnicze w różnych gałęziach techniki, jak: górnictwo, geologia, geofizyka, budownictwo, inżynieria lądowa i wodna, rolnictwo [3, 4, 6, 9, 15]. Stosowanie wybuchu do celów naukowych, inżynierskich i użytkowych wymaga dalszych badań nad działaniem wybuchu w masywach skalnych. Mimo nagromadzonych doświadczeń w tej dziedzinie nie ma jednoznacznych teorii i obliczeń do określenia działania wybuchu w górotworze lub masywie skalnym. Brak również całkowitego przedstawienia własności skał, jakie są potrzebne przy badaniu działania wybuchu. Jest to spowodowane tym, że działanie wybuchu w masywach skalnych przedstawia bardzo skomplikowane i złożone zjawisko, zawierające różnorodne procesy fizyczne, takie jak: detonacje materiałów wybuchowych, rozprzestrzenianie się fal uderzeniowych i naprężeń oraz rozsadzanie, rozpad i przemieszczanie ośrodka skalnego. Należy podkreślić również znaczną niejednorodność skał, co powoduje, że czynnik skali będzie wpływał w dużym stopniu na określenie fizykomechanicznych własności skał. Pod działaniem obciążeń dynamicznych masyw skalny ulega rozsadzeniu, rozdrabnianiu lub plastycznemu odkształceniu. Skały przechodząc do innego stanu zmieniają swoje własności.

Bardzo ważnym zagadnieniem w mechanice wybuchu jest przebadanie procesu przekazywania energii masywowi skalnemu oraz badania odkształcenia i rozsadzania próbek skalnych i masywu skalnego pod

obciążeniem dynamicznym. Badania te są nieodzowne w projektowaniu i przeprowadzaniu robót górniczo-technologicznych i górniczo-budowlanych.

Roboty wiertniczo-strzelnicze można scharakteryzować oceną kompleksową na podstawie wskaźników bezpieczeństwa, efektywności i dynamiczności. Efektywność robót strzelniczych związana jest z postępem wyrobisk udostępniających i przygotowawczych oraz z ilością urabianej skały (kopaliny użytecznej).

Istotną cechą robót strzelniczych jest ich uniwersalność, tj. możliwość ich stosowania w różnych gałęziach techniki oraz w różnych warunkach górniczo-geologicznych i górniczo-technicznych.

BADANIA PROCESU ROZSADZANIA SKAŁ KAMERAMI DO ZDJĘĆ SZYBKICH I ULTRASZYBKICH

Niezależnie od klasycznych metod badawczych coraz częściej do badań procesu rozsadzania skał stosuje się technikę filmowania kamerami do zdjęć szybkich i ultraszybkich [11-15]. Badania te umożliwiają uzyskanie dokładnych i obiektywnych danych jakościowych oraz po odpowiednim opracowaniu i zastosowaniu - odpowiedniej metodyki badań również i danych ilościowych.

W celu przebadania przebiegu rozsadzania skał przy różnym ukierunkowaniu detonacji wydłużonych ładunków materiału wybuchowego należy poznać jakościowo procesy rozprzestrzeniania się fal naprężeń, co umożliwia ustalenie ogólnych zasad współdziałania ładunków materiału wybuchowego przy różnych sposobach inicjowania tych ładunków. Na podstawie praktyki robót strzelniczych można stwierdzić, że rozdrabnianie skał o jednakowej zwięzłości w znacznym stopniu może być określane na podstawie strukturalnych własności masywu skalnego.

Określanie procesu rozsadzania coraz częściej przeprowadza się kamerami do zdjęć ultraszybkich, stosując modele ze szkła organicznego, szkła i żywicy (kalafonii). Modele te umożliwiają otrzymanie jakościowych charakterystyk powstawania i rozprzestrzeniania się fal naprężeń oraz procesu tworzenia się szczelin w modelach. Modelowanie stało się pewnym instrumentem badania zjawisk niedostępnych przy innych metodach, najkrótszą drogą poznania praw

panujących w przyrodzie, jedyną możliwością wypróbowania monumentalnych budowli i złożonych maszyn, efektywnym sposobem prognozowania rozwoju nauki i techniki oraz ustalenia głównych kierunków badań naukowych.

W pracy AA. Wowk i in. [15] opisano dokładnie badania nad procesem rozsadzania skał uwarstwionych. W tym celu wykonano modele o różnym stopniu osłabienia ciągłości oraz o różnej szczelinowości. Uwarstwione modele tworzą przez wykonywanie systemów równoległych wgłębień piłą diamentową na różną głębokość, które później wypełniano. Uwarstwienie imitowano również przez sklejenie cienkich warstewek klejami polimerowymi. Na tak wykonanych modelach badano wpływ ukierunkowania szczelinowości i uwarstwienia na sam przebieg procesu rozsadzania. Modele wykonano ze szkła, celulozoidu i pleksiglasu, tj. z płytek optycznie aktywnych materiałów o wymiarach 400x400x8 mm. Wymiary modeli oraz przewierconych, otworów zostały zmniejszone w porównaniu z wymiarami naturalnymi 100-krotnie. Z uwagi na to, że materiały modeli były wystarczająco kruche, intensywność naprężeń powstałych po strzelaniu była wystarczająca do tego, aby w modelach przeprowadzić rozsadzanie analogiczne do naturalnego. W celu zachowania warunków modelowania uwzględniano następujące parametry: długość, czas, gęstość, prędkość przemieszczeń sprężystych i stałe mechaniczne. W modelach przewiercano otworki do umieszczenia ładunku o stałych parametrach, tj. średnica ładunku 2 mm, długość ładunku 80 mm, długość przybitki 60 mm, masa ładunku 300 mg. Jako materiał wybuchowy został zastosowany pentryt, który był inicjowany azydkiem ołowiu o masie od 10 do 20 mg. Filmowanie przeprowadzono kamerą do zdjęć ultraszybkich SFR-Ł, umożliwiającą rejestrację z prędkością 2,5 miliona klatek/s. Kamerą tą można filmować powstające przy wybuchu pola naprężeń i rozsadzanie modelu. Jak wiadomo, rozwój pola naprężeń o twardych ciałach przebiega z prędkością 3000 ÷ 6000 m/s, a prędkość wzrostu kruchych szczelin 600 ÷ 2000 m/s. Wykonano serię doświadczeń, a w celu wyeliminowania wpływu błędów przypadkowych na wyniki doświadczeń - każde doświadczenie przeprowadzono trzykrotnie. Proces rozsadzania filmowano kamerą do zdjęć ultraszybkich. Na podstawie analizy klatek filmu stwierdzono, że w okresie detonacji ładunku czoło fali detonacyjnej wyprzedza front rozsadzania o wielkość 20 do 25 mm. Następnie po 21,2 μ s od początku inicjowania pojawiają się szczeliny radialne, rozprzest-

rzeniające się nieprostopadle do osi ładunku, lecz odchylają się w stronę powierzchni odsłoniętej w kierunku przebiegu detonacji. W tymże czasie kończy się proces detonacji ładunku MW. Po $42,4 \mu\text{s}$ zaczynają się zjawiska odrywania przy powierzchni odsłonięcia, a strefa rozsadzania osiąga 40 promieni ładunku. Po $84,8 \mu\text{s}$ górna część modelu w całym polu widzenia klatki filmu rozpada się. Dolna część modelu została rozbita cienkimi szczelinami, w przybliżeniu symetrycznymi do osi ładunku. W kadrze tym widać ujęcie gazów powybuchowych z otworku strzałowego. Po czasie $159,6 \mu\text{s}$ od początku zainicjowania rozsądzenie modelu osiągnęło granice pola filmowania wzdłuż całego obwodu. Z filmu można prześledzić trzy strefy rozsadzania: intensywne rozsadzanie wokół ładunku podłużnego; intensywne rozsadzanie przy powierzchni odsłoniętej od działania fali odbitej; umiarkowane rozsadzanie. Ponieważ masywy skalne zasadniczo przedstawiają się jako szczelinowate, uwarstwione ośrodki - rozpatrzono wpływ tych warunków na proces rozsadzania. Przy modelowaniu uwzględniono wytrzymałość wiązań między warstwami i kierunek szczelinowości. Przy badaniu modeli z naruszoną ciągłością stwierdzono na podstawie analizy filmów, że następuje przy tym zmiana zarówno w samym procesie rozsadzania jak i w końcowych wynikach rozsadzania. Obniża się prędkość rozprzestrzeniania szczelin radialnych i następuje zmniejszenie strefy rozsadzania od działania odbitej fali naprężeń z powierzchni odsłoniętej. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że szczelinowaty masyw skalny charakteryzuje się szeregiem cech szczególnych, z których ważniejsze są następujące:

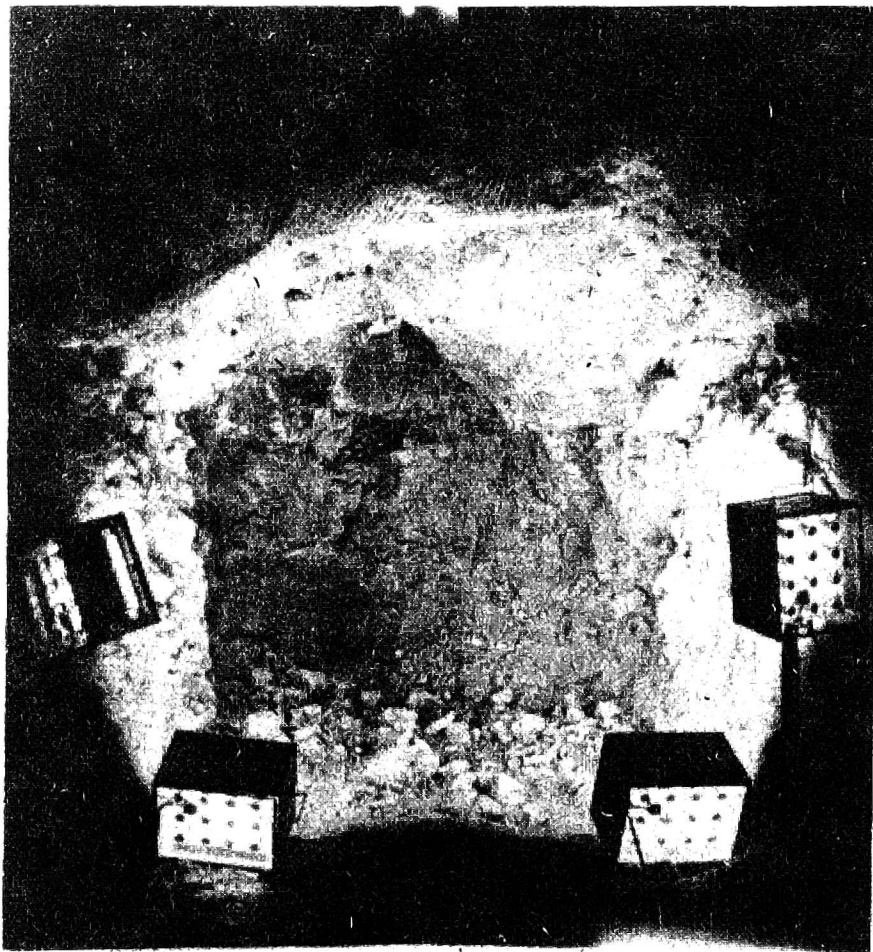
- szerokość szczelin i materiał wypełniający szczeliny wpływają na wielkość prędkości przebiegu fal podłużnych, na moduł sprężystości i wytrzymałości masywu skalnego;
- rozdzielony szczelinami masyw skalny nie jest podatny na naprężenia rozciągające;
- charakterystyka mechaniczna i sprężysta każdej części masywu skalnego, określająca jej rozdrabnianie przy wybuchu jest wyższa niż całego masywu skalnego;
- przedstawione właściwości warunkują różny charakter procesu rozsadzania szczelinowego masywu skalnego przez wybuch oraz zmianę objętości i stopień rozdrabniania odstrzelonego urobku skalnego.

Filmowanie techniką zdjęć szybkich i ultraszybkich wybuchu,

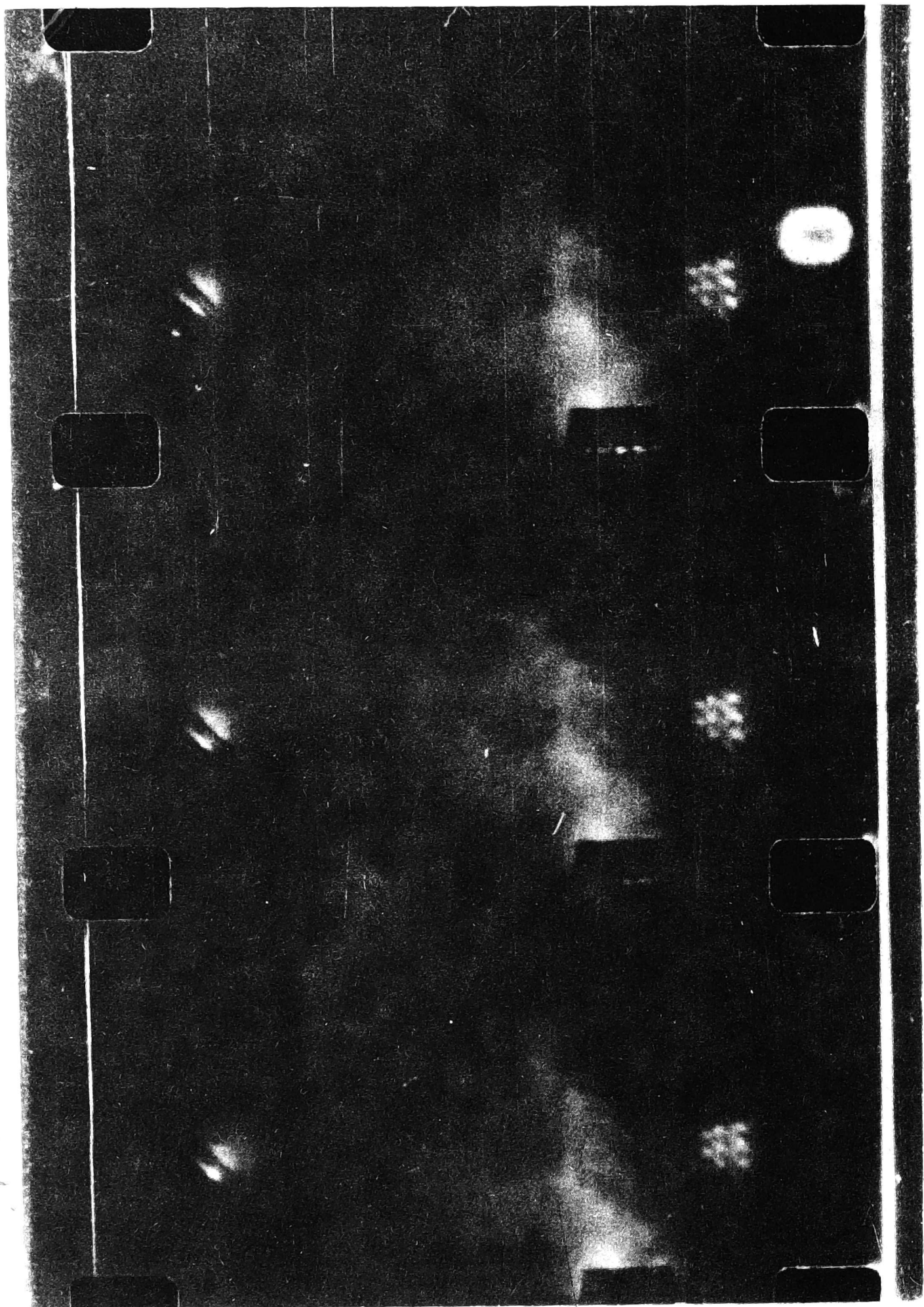
rozsadzania i rozpadu skał, co szerzej opisano w pracach [2-13, 15], umożliwiło autorowi przebadanie jakościowe i ilościowe zjawisk i zachodzących procesów oraz wyznaczenie wskaźników i parametrów charakteryzujących rozsadzanie skał i masywów skalnych.

Bardzo ważnym zagadnieniem związanym z bezpieczeństwem i efektywnością rozsadzania masywów skalnych jest dobór materiałów i konstrukcji przybitki do otworów strzałowych. Przybitkę wykonuje się w końcowej części otworów strzałowych po umieszczeniu w nich ładunków materiałów wybuchowych albo też stosuje się przybitkę pośrednią przy ładunkach rozczłonowanych. Najczęściej stosuje się przybitkę wykonywaną jako tzw. kluski z gliny lub gliny z piaskiem, ze zwiercin, z piasku, z granulowanego żużla, z pojemników wypełnionych wodą, z wody pod ciśnieniem oraz ze specjalnych past i żeli.

Stosowanie przybitki zwiększa bezpieczeństwo robót strzelniczych, podnosi rozsadzająco działanie wybuchu dzięki lepszemu wykorzystaniu energii materiałów wybuchowych, zmniejsza jednostkowe

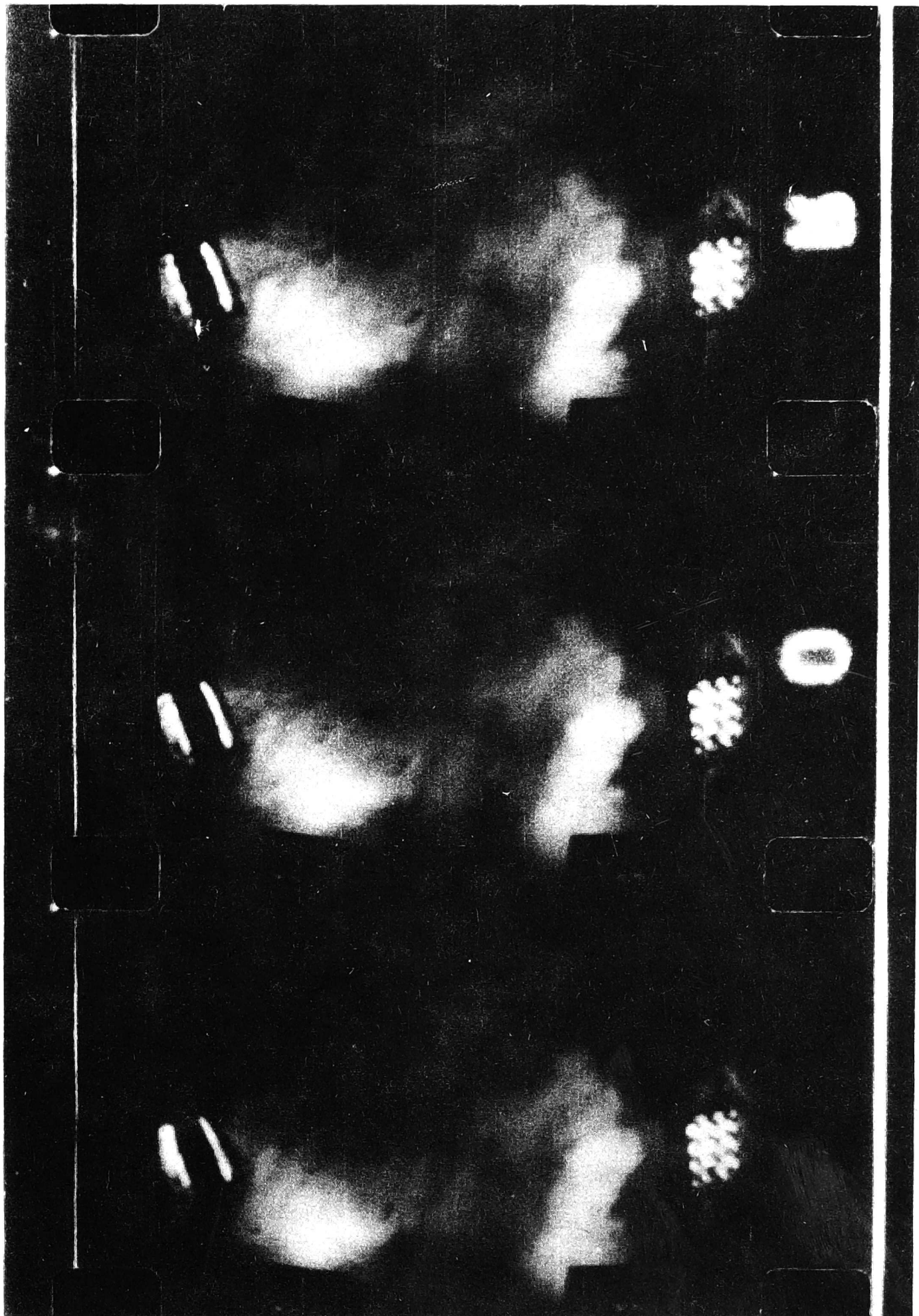


Rys. 1. Widok czoła komory odstawczej w kopalni Olkusz z odwierconymi otworami obrysowymi przed filmowaniem kamerą do zdjęć szybkich



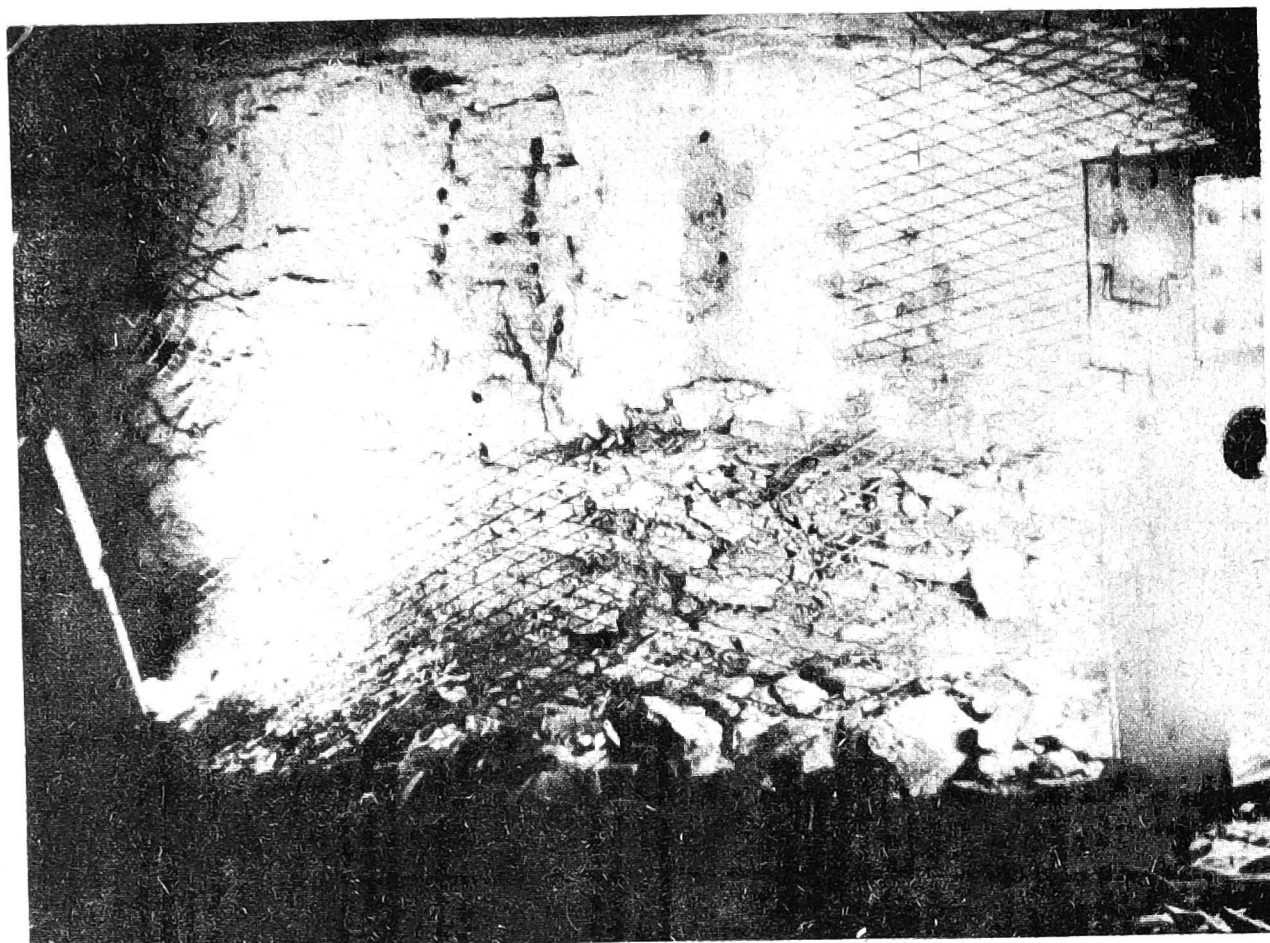
Rys. 2. Fotografie poklatkowe przedstawiające przebieg wylotu produktów wybuchu po odstrzale komory odstawczej w kopalni Olkusz: A- stadium początkowe,

Fot. M. Hobler



Rys. 2. Fotografie poklatkowe przedstawiające przebieg wylotu produktów wybuchu po odstrzale komory odstawczej w kopalni Olkusz: B - stadium końcowe

Fot. M. Hobler

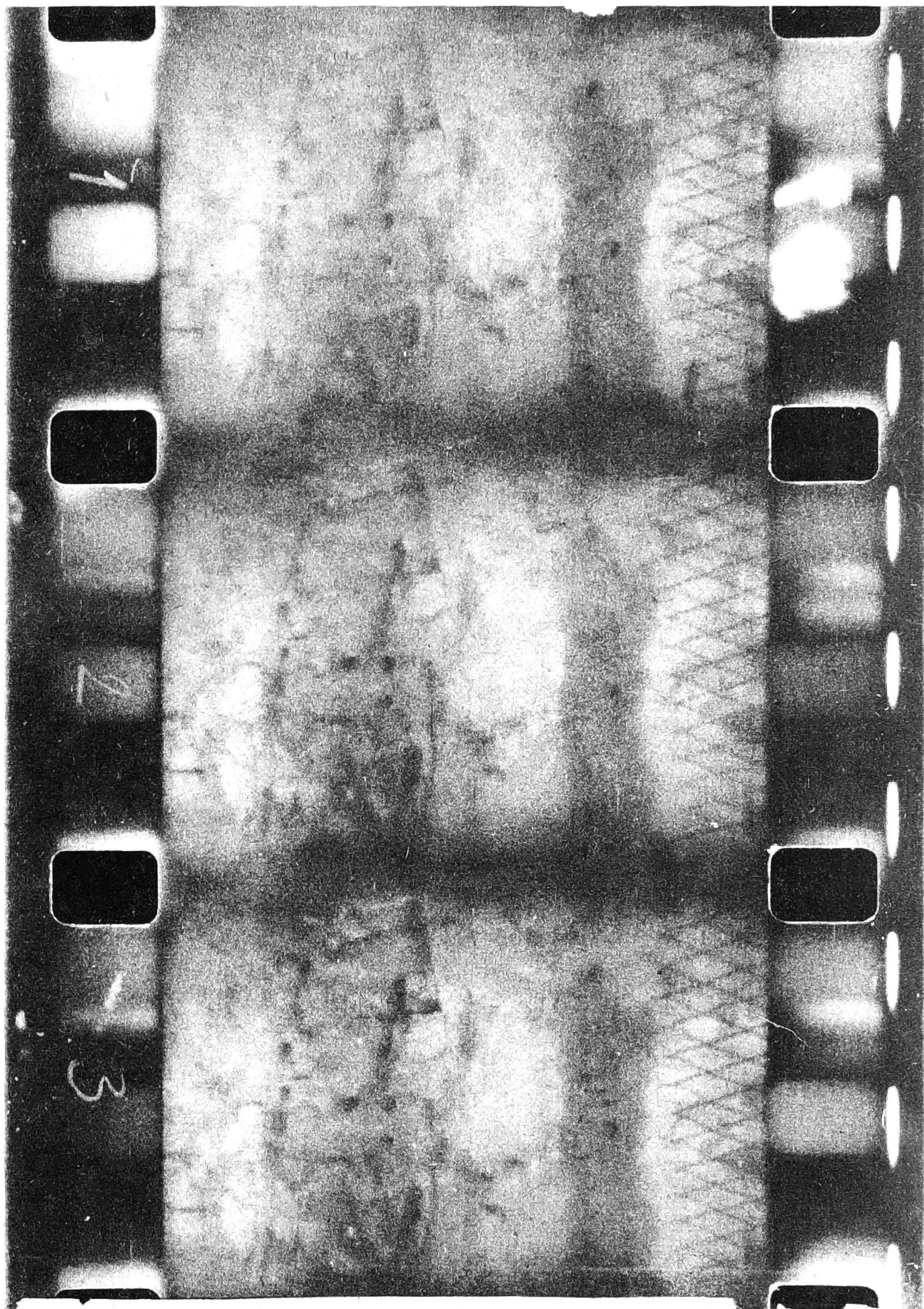


Rys. 3. Widok włomów szczelinowych w kopalni Rudna z naświetlaczami i siatkami ochronnymi

Fot. M. Hobler

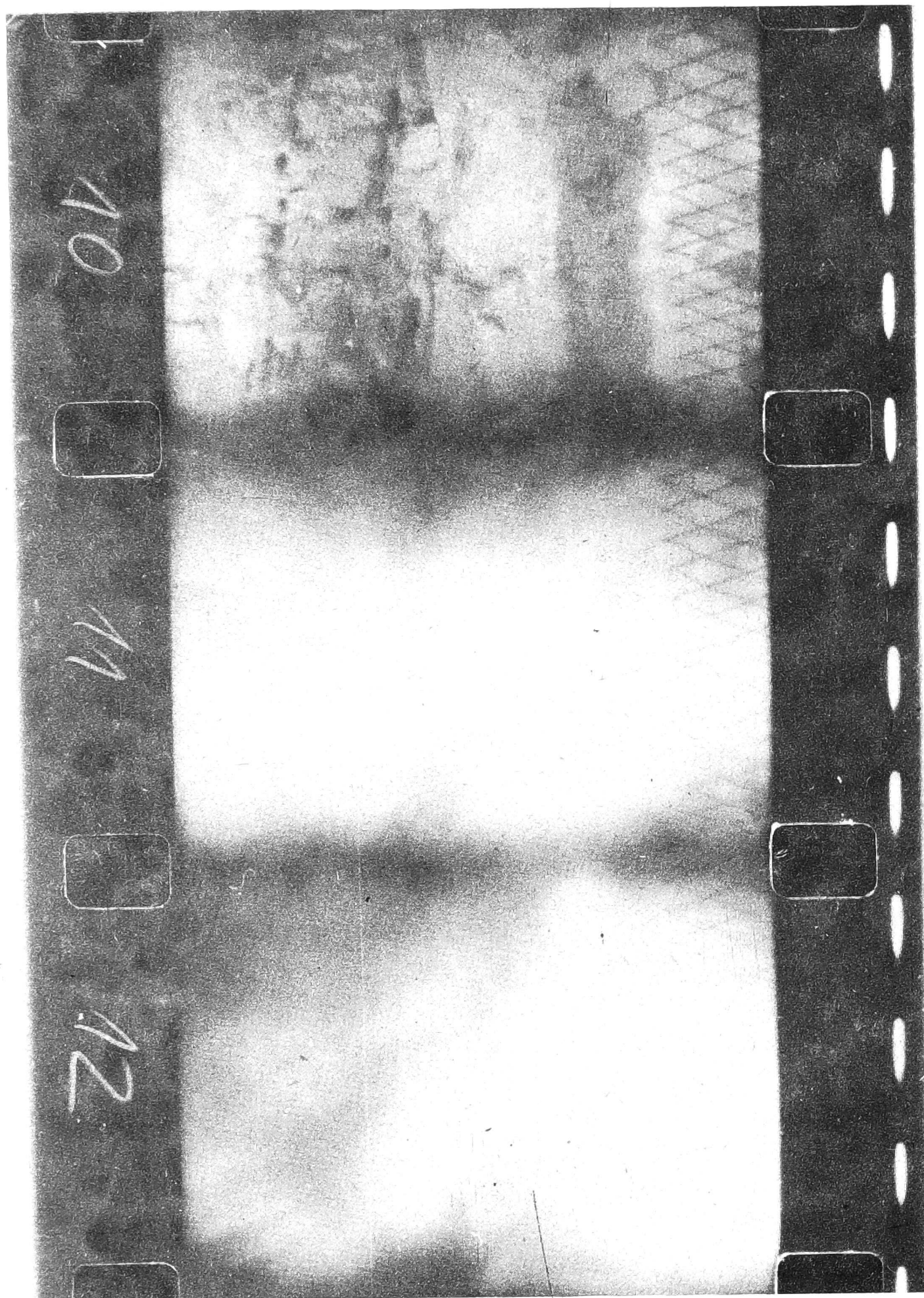
zużycie materiałów wybuchowych oraz zmniejsza ilość gazów trujących przy wybuchu. Szczególne znaczenie posiada przybitka przy wykonywaniu robót strzelniczych w wyrobiskach podziemnych, gdzie wydziela się metan lub tworzy pył węglowy, które w atmosferze kopalnianej tworzą wybuchowe mieszaniny. Powiększenie efektów wybuchu przy stosowaniu przybitki w otworach strzałowych, w porównaniu z odstrzelaniem bez przybitki, następuje dzięki lepszemu przereagowaniu materiałów wybuchowych na produkty detonacji oraz dłuższemu czasowi, w którym znajdują się gazy powybuchowe pod wysokim ciśnieniem w otworach strzałowych, oddziałując na rozszarpany maszyn skalny. Na powiększenie efektów wybuchu można wpływać przez dobór właściwego materiału przybitki oraz optymalnej długości przybitki. Przy stosowaniu przybitki następuje 2,5-krotne obniżenie gazów trujących wyrzucanych z otworu strzałowego w stosunku do strzelania bez przybitki.

W kopalni cynku i ołowiu Olkusz autor przeprowadził odstrzelanie komory metodą otworów obrysowych (metodą gładkościenną)



Rys. 4. Przebieg wylotu produktów wybuchu po odstrzale włomów szczelinowych w kopalni Rudna: A - stadium początkowe,

Fot. M. Hobler



Rys. 4. Przebieg wylotu produktów wybuchu po odstrzale włomów szczelinowych w kopalni Rudna: B - stadium końcowe

Fot. M. Hobler

po uprzednim odstrzelaniu otworów włomowych, pomocniczych i urabiających oraz wybraniu urobku. Równocześnie przeprowadzono filmowanie kamerą do zdjęć szybkich Pentazet 16. Na rysunku 1 komora jest oświetlona czterema naświetlaczami konstrukcji autora. Dwie fotografie poklatkowe z filmu przedstawiają przebieg wylotu produktów wybuchu poszczególnych otworów obrysowych po odstrzeleniu (rys. 2A B). Prędkość filmowania wynosiła 600 klatek/s przy przysłonie 4. Filmowanie umożliwia dokładne określenie przebiegu przedarcia się i wylotu oraz rozprzestrzenienia produktów wybuchu.

Odstrzeliwanie włomów szczelinowych z równoczesnym filmowaniem przeprowadzono w kopalni miedzi „Rudna”. W tym przypadku naświetlaczę umieszczono bardzo blisko obiektu filmowania (rys. 3). Naświetlaczę zabezpieczono przed odłamkami odpowiednio rozmieszczonymi i umocowanymi siatkami. Filmowanie przeprowadzono kamerą Pentazet 16; prędkość filmowania wynosiła 600 klatek/s przy przysłonie 4. Na dwóch fotografiach poklatkowych z filmu /pierwsza i ostatnia/ przedstawiono przebieg wylotu produktów wybuchu (rys. 4). Przebieg ten ma całkiem inny charakter niż w komorze kopalni Olkusz. Na fotografiach widać jednoczesny wylot produktów wybuchu ze wszystkich odstrzeliwanych otworów.

Badania kamerami do zdjęć szybkich umożliwiają ocenę efektywności i określenie optymalnej długości przybitki, porównanie przybitek z różnych materiałów i różnej ich konstrukcji oraz przebieg rozprzestrzeniania się produktów wybuchu.

WNIOSKI

1. Na charakter i przebieg rozsadzania modeli wpływają głównie następujące czynniki: typ materiału wybuchowego, konstrukcja i wielkość ładunku, rodzaj i konstrukcja przybitki oraz sposób inicjowania.

2. Bardzo wiele badań przeprowadzonych nad przybitką potwierdziły, że podwyższa ona, a nawet zwielokrotnia efekt wybuchu. Umożliwia również wyeliminowanie zapalenia się mieszanki metanu z powietrzem i pyłu węglowego z powietrzem.

3. Opisane badania z zastosowaniem kamer do zdjęć szybkich i ultraszybkich umożliwiają filmowanie przebiegu rozsadzania oraz określenie jakościowe i ilościowe parametrów rozsadzania i ich analizę.

LITERATURA

1. Cruise J., Newman A.: Photographic techniques in scientific research. Academic Press London-New York 1973.
2. Hobler M.: Badania nad rozsadzaniem próbek węglowych i caliny węglowej z użyciem kamery do szybkich zdjęć. Politechnika Gdańska. MNSWiT Warszawa 1972.
3. Hobler M.: Badania nad efektywnością rozsadzania materiałem wybuchowym w wyrobisku węglowym. Zesz. Nauk. AGH, Górnictwo Kraków 1972, z. 41.
4. Hobler M.: Blasting in Coal Heading. Colliery Guardian London 1974, nr 4.
5. Hobler M.: Fotograficzeskaja registracija skorostnoj kameroj podziemnego wzrywania gornych porod. Budapest Research Film Days 774 - 5 May. Budapest 1977.
6. Hobler M.: Badanie robót strzelniczych w kopalniach rud miedzi, cynku i ołowiu. Cuprum 1977, nr 6.
7. Hobler M.: Investigations on the rock burst process by blasting with the simultaneous film recording, using a high-speed camera Research film. Göttingen-Paris 1977, Vol. 9, nr 3.
8. Hobler M.: Zastosowanie zdjęć szybkich do badania próbek i rozsadzania ociosu węglowego. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1977, z. 188.
9. Hobler M.: Badania fizykomechanicznych własności skał. PWN, Warszawa 1977.
10. Hobler M.: Zastosowanie fotografowania i techniki zdjęć szybkich przy badaniu strzelania w kopalniach rud. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 1981, z. 237.
11. Hobler M.: Możliwości i perspektywy zastosowania techniki filmowej zdjęć szybkich i ultraszybkich do badania procesów dynamicznych. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1984, z. 296.
12. Hobler M.: Zastosowanie Techniki fotograficznej i filmowej w badaniach szczelinowości skał. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1981, z. 237.
13. Hobler M.: Photographis - und Filmforschungen der Gasteinzerklüftung. Budapest Research Film Days '81 6 + 8 May Budapest 1981.
14. Rolfs P. J. (wyd.): High speed photography. Chapman and Hall, London 1975.
15. Wowk A. A., Tkaczuk K. N., Hobler M. A.: Wzrywnyje raboty w słożnych gorno-geologiczeskich usłowijach. Izd. Naukowa Dumka, Kijew 1980.

Мечислав Хоблер

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, А ТАКЖЕ ИССЛЕДОВАНИЯ IN SITU
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНОКАМЕРЫ ДЛЯ БЫСТРЫХ И СВЕРХБЫСТРЫХ СЪЕМОК,
КАСАЮЩИЕСЯ РАЗРЫВА СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ

Р е з ю м е

В статье описываются исследования проведенные автором в шахте цинка и свинца „Олькуш“ по разрыву камер по методу контурных отвер-

стей (гладкостенный метод) после предварительного взрыва срубных, вспомогательных и отбойных отверстий, а также выноса выработки. Ход разрывов фильмовали с использованием кинокамеры для быстрых съемок Пентазет 16. Кинокамера освещалась прожектором сконструированным автором. Скорость фильмования составляла 600 кадров в секунду при диафрагме 4. В шахте „Рудна“ проводились взрывы целевых отбоев с одновременным фильмованием кинокамерой Пентазет 16 при вышеуказанной скорости фильмования и диафрагме. В обоих случаях было получено точное определение процесса вылетания и распространения продуктов взрыва. Это имеет важное значение в определении эффективности, рода материала, конструкции и оптимальной длины сбойки.

Описываются также модельные исследования в 100-кратно уменьшенном масштабе в сравнении с естественными размерами, касающиеся процесса разрыва прослойных скал. Ход разрыва фильмовали кинокамерой СФР-1 для сверхбыстрых съемок, делающей возможной фильмование со скоростью 2,5 млн кадров в минуту. Эти исследования позволили установить, что на характер и ход разрыва моделей влияют в первую очередь следующие факторы: тип взрывчатки, конструкция и величина заряда, род и конструкция сбойки, а также способ инициирования.

Mieczysław Hobler

MODEL INVESTIGATIONS AND IN SITU
INVESTIGATIONS WITH THE USE OF FILM CAMERAS
FOR RAPID AND ULTRARAPID SHOTS IN BLOWING OFF ROCK MASSIVES

S u m m a r y

Investigations carried out in the zinc and lead mine of Olkusz on firing chambers by the method of contour openings (smooth-wall method) after preliminary firing breaking-off, auxiliary and win holes and extraction of winning are described in the paper. The blowing-off course was filme with the use of the Pentazet 16 film camera for rapid shots. The camera was lighted by flood-lights constructed by the author. The filming speed amounted to 600 frames per second at the diaphragm 4. In the mine of Rudna firing of breaking-in holes at simultaneous filming with the use of the Penta-

zet 16 film camera at the same filming speed and diaphragm was carried out. In both cases the course of escape and spreading of explosion products was exactly determined. It is of importance for determination of efficiency, material kind, construction and optimum length of tamping.

Also model investigations in the 100-fold diminished scale as compared with natural dimension, concerning the process of blowing-off stratified rocks are described. The blowing-off course was filmed with the use of the SFR-Ł film camera for ultrarapid shots enabling registration at the filming speed of 2.5 million frames per second. These investigations enabled to state that the following factors affect the character and course of blowing-off models: explosive type, construction and size of charge, kind and construction of tamping and the initiation way.