

O MOŻLIWOŚCI ROZSZERZENIA METODYKI BADAŃ POWIERZCHNI PĘKNIĘĆ  
ZMĘCZENIOWYCH\*)

STANISŁAW KOCĄDA, JAN KOZUBOWSKI (WARSZAWA)

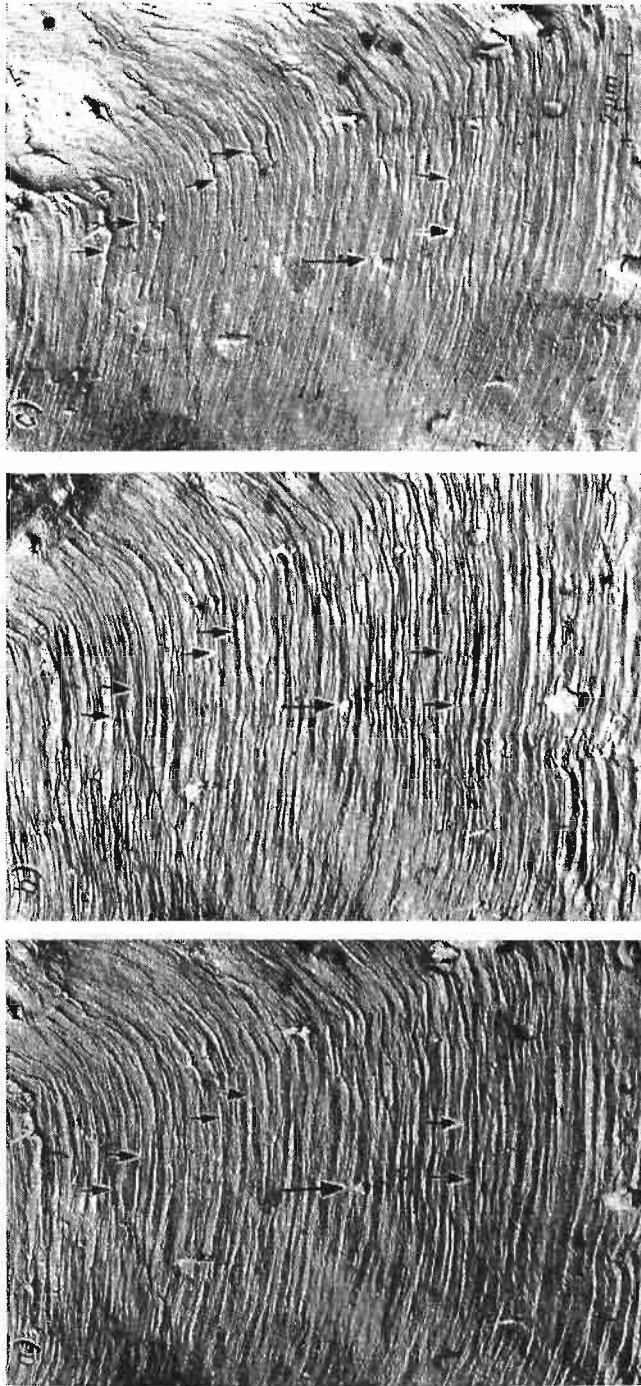
Badania mikrobudowy złomów zmęczeniowych stwarzają dobre podstawy do fizycznej i praktycznej interpretacji przebiegu zmęczeniowego pęknięcia. Najwięcej informacji dostarczają prążki, jako wspólna cecha większości złomów zmęczeniowych, umożliwiające dość pełne odtworzenie historii obciążenia (liczba cykli rozwoju pęknięcia; orientacyjna, całkowita liczba cykli obciążenia; średnie prędkości pęknięcia; przybliżone wartości naprężeń eksploatacyjnych). Za pomocą badań elektrooptycznych możemy wykryć i scharakteryzować pierwotne i wtórne ogniska pęknięć; opisać rozwój pęknięcia w poszczególnych strefach złomu; określić udział pęknięć plastycznych i kruchych; dowiedzieć się o pękaniu wydzieleni i stref do nich przylegających; o lokalnym przyspieszaniu lub opóźnianiu pęknięcia; o rozmieszczeniu, gęstości i zasięgu pęknięć wtórnych; o stopniu oddziaływania różnych ośrodków. Rejestrujemy różne informacje dodatkowe, jak sam przebieg i budowę prążków, pęknięcia wtórne wzdłuż ścianek prążków, pasma poślizgów na powierzchniach pęknięć, budowę strefy resztkowej i charakter pęknięcia w tej strefie. Do opisywanych badań wykorzystujemy głównie mikroskopy elektronowe transmisyjne, prześwietleniowe (oznaczane skrótem TEM) i mikroskopy elektronowe skaningowe (SEM). Badanie powierzchni pęknięć zmęczeniowych metodą replik w TEM jest dość żmudne. Dostarcza jednak najwierniejszych obrazów mikrorzeźby złomu, do czego przyczynia się wysoka zdolność rozdzielcza i przede wszystkim duża głębokość ostrości (około 1000 razy większa niż w mikroskopie optycznym). Równie duża głębokość ostrości i wystarczająca zdolność rozdzielcza w SEM umożliwiają śledzenie charakterystycznych cech powierzchni pęknięć, bez konieczności sporządzania replik; wycinki powierzchni ogląda się bezpośrednio. Ceną zaletą SEM jest możliwość ciągłej obserwacji powierzchni złomu przy stopniowo narastających powiększeniach (na przykład od 1 do 10 000 razy), a zatem możliwość badania interesujących nas szczegółów mikrobudowy. Podobieństwo obrazów oglądanych w obydwóch mikroskopach TEM i SEM jest na ogół dobre; obrazy uzyskiwane z TEM są jednak szczegółowsze, a z SEM — jakby « głębsze », sprawiające wrażenie obrazów przestrzennych. Połączenie badań mikrofraktograficznych z badaniami prześwietleniowymi cienkich folii, mające na celu powiązanie cech mikrobudowy złomów z substrukturą warstwy wierzchniej pęknięcia, ułatwia wnikanie w istotę mechanizmu pęknięcia. Ilościowe określenie tych cech morfologicznych przekształciło mikrofraktografię jakościową w ilościową.

\*) II część referatu problemowego wygłoszonego na VI Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, zorganizowanym przez Oddział Warszawski Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej oraz Instytut Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej w Warszawie, we wrześniu 1974 r.

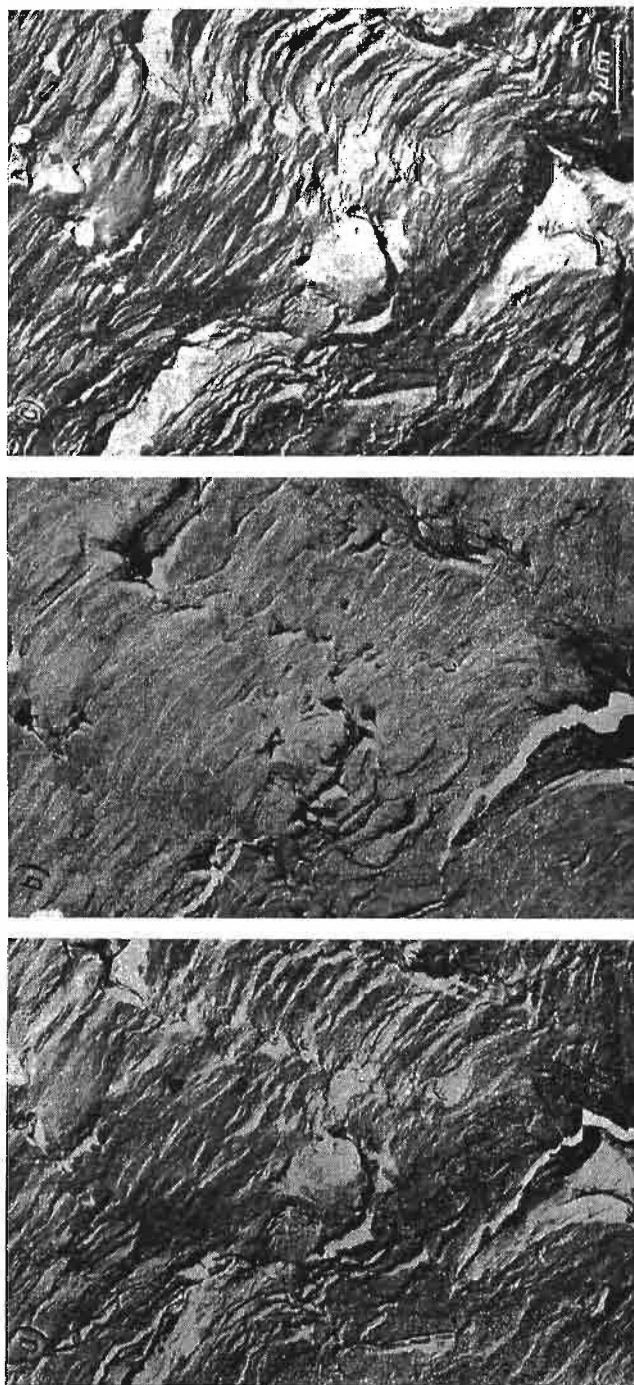
Do obserwacji w TEM używa się najczęściej konwencjonalnych replik jedno- lub dwustopniowych, cieniowanych parami różnych metali. Istnieje jednak możliwość błędów odwzorowania i uszkodzenia replik podczas ich zdejmowania z bardzo rozwiniętych powierzchni pęknięć, zawierających zwłaszcza ostre krawędzie czy pęknięcia wtórne. Uzupełnienie TEM urządzeniem do nachylania replik pod różnym kątem w zakresie  $\pm 60^\circ$  pomogło w wyjaśnieniu nie zawsze czytelnych, a stąd trudnych do interpretacji obrazów. Zwrócił na to szczególną uwagę D. BROEK [1].

Celem niniejszej pracy jest właśnie pokazanie na podstawie wybranych przykładów, jak może się zmieniać elektronooptyczny obraz powierzchni pęknięć przez nachylanie repliki. Badania wykonywano na mikroskopie transmisyjnym Philips EM 300. Wykorzystano dwustopniowe repliki acetylocelulozowo-węglowe cieniowane platyną w kierunku przeciwnym do rozwoju pęknięć, które we wcześniejszych badaniach własnych obserwowano w mikroskopie JEM-6A.

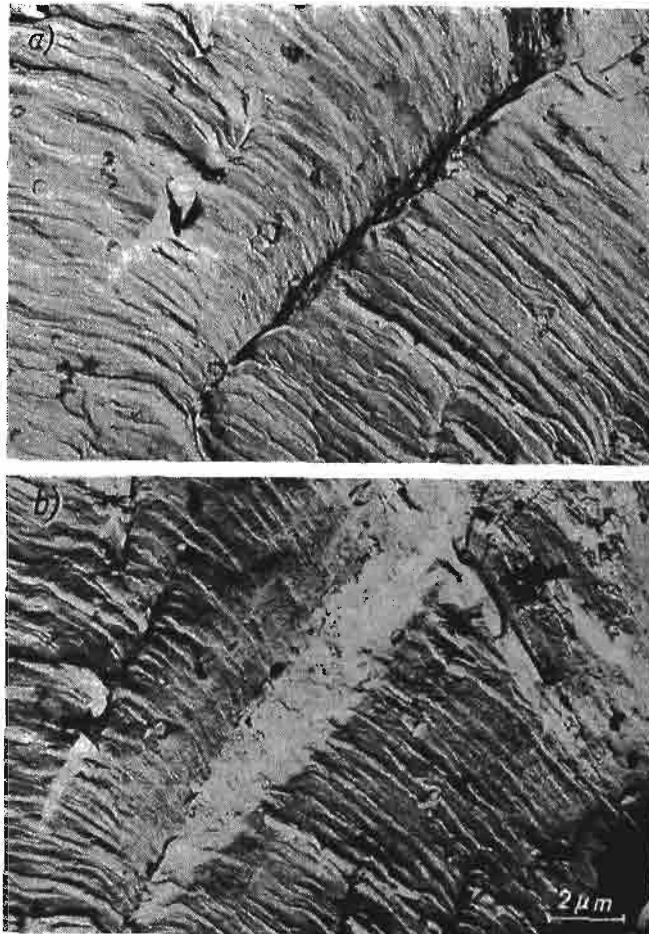
Plastyczne prążki zmęczeniowe na powierzchni pęknięcia wyżarzanej stali węglowej St2 oglądamy na rys. 1. Pęknięcie zostało wywołane płaskim zginaniem przy współczynniku amplitudy cyklu  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,25$ , a badania elektronooptyczne tych pęknięć opisano w [2] (stosowano mikroskop JEM-6A). Warto przypomnieć, że prążki są śladami przemieszczającego się w każdym cyklu pęknięcia. Jeden prążek odpowiada zatem jednemu cyklowi obciążenia (na ogół). Są one prostopadłe lub prawie prostopadłe do kierunku rozwoju pęknięcia. Z odstępów między prążkami (które szczegółowo przeanalizowano w [3]) oblicza się prędkość zmęczeniowego pęknięcia. Uwypuklone na rys. 1a prążki stają się wyraźniejsze po nachyleniu repliki o kąt  $+30^\circ$  (rys. 1b); obrócenie o kąt  $-30^\circ$  czyni układy prążków mniej wyraźne, ale wykazuje istnienie licznych pęknięć wtórnych, których ślady pokrywają się z krawędziami prążków (strzałki na rys. 1c). Nie były one wyraźnie widoczne na rys. 1a i 1b. Obserwacje innego wycinka tego samego złomu, którego obraz przedstawiono na rys. 2a, ale pod kątem  $-30^\circ$ , doprowadziły do zaniknięcia obrazu typowych prążków (rys. 2b). Ujawniły się one najlepiej po nachyleniu repliki o kąt  $+30^\circ$  (rys. 2c). Istnieje zatem prawdopodobieństwo niewykrycia istniejących prążków w określonych warunkach doświadczalnych. Ostatnie zdjęcie (na rys. 2c) jest jednocześnie dowodem licznych uskoków i nieregularnej mikrorzeźby powierzchni pęknięcia, czego nie można było dostrzec na dwóch poprzednich zdjęciach (rys. 2a i 2b). Jeszcze inny przykład z badań strefy zmęczeniowej stali St2 pokazano na rys. 3. Na rys. 3a widoczna jest ciemna linia — jakby przekątna zdjęcia, oddzielająca dwa układy prążków. Taka linia jest zwykle właściwa pęknięciom wtórnym, biegnącym od powierzchni głównego pęknięcia w głąb materiału. Nachylenie repliki pod kątem  $40^\circ$  wykazało jednak, że linia ta jest śladem uskoku (spowodowanego pęknięciem wtórnym typu ścięcia — rys. 3b). Zatem sąsiadujące ze sobą układy nie leżą ściśle w jednej płaszczyźnie pęknięcia, jak to można było sądzić na podstawie zdjęcia na rys. 3a. Również nie w jednej płaszczyźnie znajduje się wycinek z plastycznymi prążkami i przejściowa strefa ścięcia do przełomu kruchego, wywołanego obciążeniem udarowym (szczegóły w [2]). Do odwrotnego przypuszczenia skłaniałoby nas zdjęcie na rys. 4a. Nachylenie strefy przejściowej, tworzącej uskok, jest dobrze widoczne na rys. 4c. Zwraca również uwagę zmiana wyrazistości obrazu prążków na poszczególnych zdjęciach. Nadmienmy, że tego rodzaju badania stref przejściowych zyskują na znaczeniu przy poszukiwaniu relacji pomiędzy tzw. strefą wydłużoną (będącą jak gdyby przedłużeniem pęknięcia



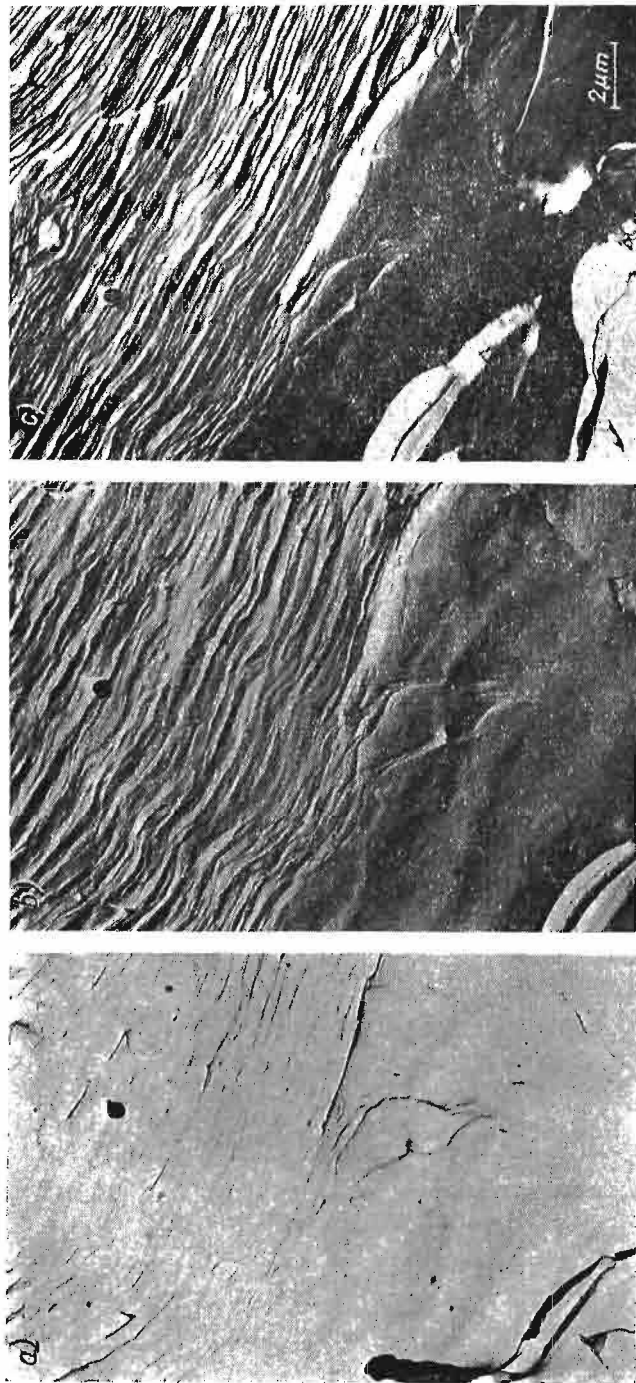
Rys. 1. Prażki na powierzchni zmęczeniowego pęknięcia w stali St2 oglądane przy nachyleniu repliki 0° (a), + 30° (b) i - 30° (c). Większa strzałka wskazuje na kierunek rozwoju pęknięcia, a strzałki mniejsze na pęknięcia wtórne



Rys. 2. Zmiana obrazu prążków zmęczeniowych na złomach stali Si2 przy nachyleniu repliki 0° (a), -30° (b) i +30° (c)



Rys. 3. Wycinek powierzchni zmęczeniowego pęknięcia w stali St2 (a) z uskokiem ujawnionym przez nachylenie repliki o  $40^\circ$  (b)

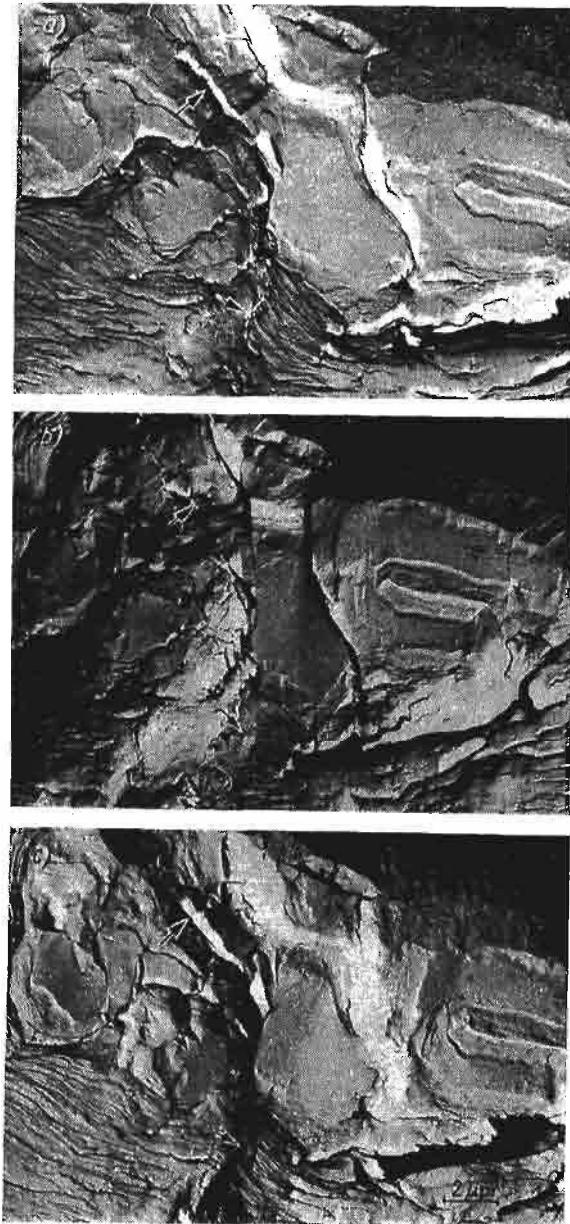


Rys. 4. Obraz strefy przejściowej od złomu zmęczeniowego do złomu wywołanego udarowym zginaniem w stali S2 przy nachyleniu repliki  $+38^\circ$  (a),  $0^\circ$  (b) i  $-38^\circ$  (c)

zmęczeniowego) i wielkością następującego po niej uskoku a odpornością na pękanie  $K_c$  i wielkością otwarcia pęknięcia.

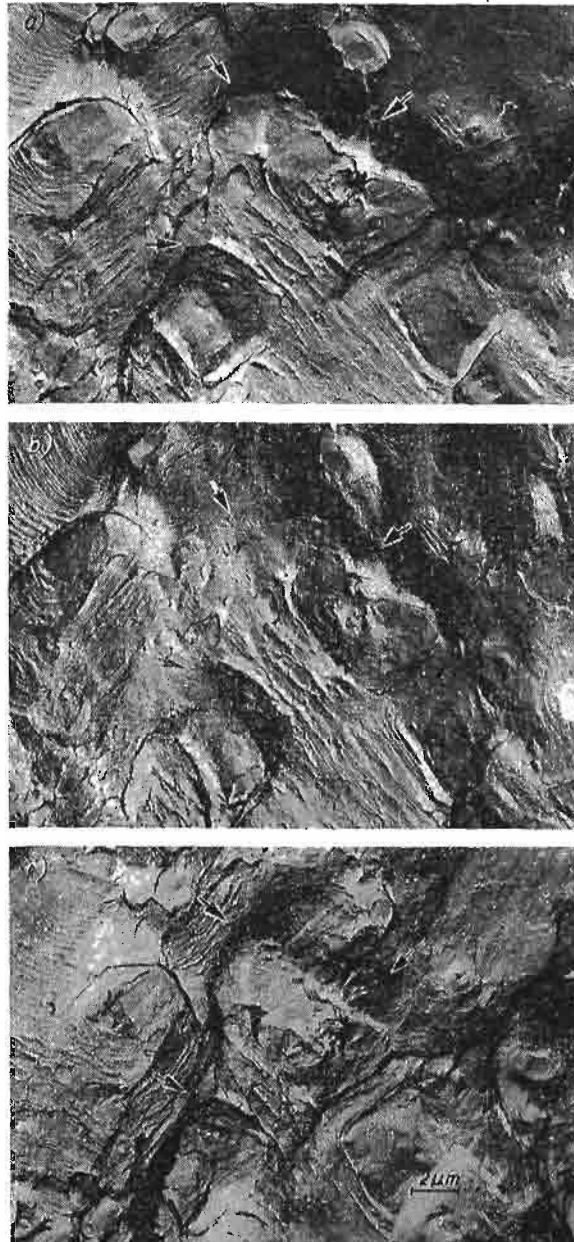
Dalsze przykłady pochodzą z badań powierzchni pęknięć zmęczeniowych w elementach z przesyconego i naturalnie starzonego stopu aluminium PA6, poddawanych wahadłowemu zginaniu przy  $\sigma_a = 8 \text{ kG/mm}^2$ . Uległy one zniszczeniu po  $1,02 \cdot 10^6$  cyklach obciążenia. Obrazy mikrofraktograficzne tych pęknięć (oglądane w mikroskopie JEM-6A) przeanalizowano w [3] oraz w publikacjach [4] i [5]. Kolejno opisywane zdjęcia wycinków tej samej powierzchni pęknięcia pochodzą z obserwacji w mikroskopie Philips EM 300 — podobnie jak zdjęcia przelomów stali St2. Pęknięcia łupliwe wydzieleni faz wtórnych oraz plastyczne prążki w osnowie widać na rys. 5a. Wygląd powierzchni pęknięcia w wydzieleniu w środkowej części zdjęcia sugeruje prawie doskonałe pęknięcie w płaszczyźnie łupliwości. Jednak nachylenie repliki pod kątem  $-30^\circ$  (rys. 4b) i  $+30^\circ$  (rys. 4c) wskazuje na liczne, drobne uskoki rozchodzące się promieniście z ogniska na granicy fazowej wydzielenia i osnowy. Ponadto na rys. 5c uwypuklił się większy uskok niewidoczny na rys. 5a i 5b. Pamiętajmy, że powstawanie wszelkiego rodzaju uskoków na powierzchni pęknięcia przyczynia się do hamowania jego rozwoju. Podobnie, większe uskoki zaznaczają się na zdjęciach na rys. 6. Faliście biegnący uskok na rys. 6c przez całą szerokość zdjęcia jest zupełnie niewidoczny na rys. 6b, a tylko częściowo na rys. 6a. Odzwierciedla się ponadto złożoność i przestrzenność mikrorzeźby powierzchni pęknięcia, wywołana różnymi mechanizmami pęknięcia wydzieleni i osnowy oraz stref do nich przylgających. Uzyskanie takich obrazów ułatwia wyjaśnienie lokalnych zmian kierunku pęknięcia, wskazywanych przez układy prążków. Na podstawie szczególnych oznak na zdjęciach na rys. 7a i 7b można przypuszczać, że powierzchnia pęknięcia w wydzieleniu fazy wtórnej nie pokrywa się z powierzchnią pęknięcia w osnowie, ale dopiero oczywistym dowodem tego jest zdjęcie na rys. 7c, otrzymane przez odpowiednie nachylenie repliki. Zniszczone wydzielenie wystaje ponad otaczającą go strefę, a tzw. ślady wgniecia (opisane w [3]) na poboczu wydzieleni w strefie granicy międzyfazowej stanowią świadectwo « wyciągania » osnowy wokół wydzielenia. Zatem wystająca kolumnienka wydzielenia, jak gdyby łącząca obie, przylgające do siebie powierzchnie pęknięcia, sprzyja hamowaniu pęknięcia. Zaznaczmy jednak wyraźnie, że przy innym usytuowaniu powierzchni pęknięcia w wydzieleniu, pokrywającej się na ogół z powierzchnią pęknięcia głównego, to ostatnie jest zwykle przyspieszane przez pękanie wydzieleni faz wtórnych.

Kierunki dalszych badań powierzchni pęknięć wytyczają dotychczasowe niepełne wiadomości o relacji: prążki a prędkość pęknięcia w warunkach obciążeń eksploatacyjnych, a więc — obciążeń o widmach złożonych, przypadkowych, z różnego rodzaju przeciążeniami i różną kolejnością ich występowania; nie znamy również dokładniej tej relacji w strefach inicjacji pęknięć czy w elementach z naprężeniami własnymi. Interesujące byłoby też uchwycenie wpływu naprężenia średniego na układ prążków. Nie dysponujemy wystarczającymi wiadomościami o rozwoju pęknięcia w próżni, które pozwoliłoby wyjaśnić sugestie prawdopodobnej, jak gdyby «wtórnej kohezji» ścianek pęknięć, w różnych ośrodkach i przy wysokich ciśnieniach. Kontynuacja badań zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej pęknięć ułatwi ich sprzężenie z budową prążków. Istnieje pytanie, czy tzw. zaciskanie się pęknięcia zaznacza się wyraźnie w mikrobudowie złomu. Badania powinny zdążać w kierunku odtwarzania budowy prążków uszkodzonych w warunkach atmosferycznych.



Rys. 5. Wycinek powierzchni złomu zmęczeniowego stopu PA6 z pęknięciami łupliwymi w wydzieleniach faz wtórnych, oglądany przy nachyleniu repliki  $0^\circ$  (a),  $-30^\circ$  (b) i  $+30^\circ$  (c). Strzałki na rys. 5c wskazują na większy uskoki





Rys. 6. Wycinek powierzchni złomu zmęczeniowego stopu PA6 z różnie usytuowanymi układami prążków przy nachyleniu repliki  $0^\circ$  (a),  $+30^\circ$  (b) i  $-30^\circ$  (c). Strzałki wskazują na falisty, większy uskok, widoczny najlepiej na rys. 6c



Rys. 7. Powierzchnia złomu zmęczeniowego stopu PA6 z pęknięciem łupliwym w wydzieleniu fazy wtórnej przy nachyleniu replik  $0^\circ$  (a),  $-30^\circ$  (b) i  $+30^\circ$  (c); na ostatnim zdjęciu widać wystającą kolumnkę wydzielenia ponad powierzchnię głównego pęknięcia

rycznych (czy w innych ośrodkach); w kierunku polepszenia obrazu skutków zmęczeniowego działania w zahartowanych elementach stalowych. W tych właśnie problemowo nakreślonych badaniach, stosowanie uzupełniających metod badawczych, jak przedstawione nachylanie replik w TEM, przyczyni się do bardzo istotnego wzbogacenia tak bardzo poszukiwanych informacji dla rekonstruowania historii obciążenia — na podstawie mikrobudowy powierzchni pęknięć zmęczeniowych.

#### Literatura cytowana w tekście

1. D. BROEK, *Some contributions of electron fractography to the theory of fracture*, National Aerospace Laboratory NLR the Netherlands. NLR TR 72029, 1973.
2. A. KOCAŃDA, S. KOCAŃDA, J. KOZUBOWSKI, *Mikrofraktografia strefy przejściowej pęknięcia w stali węglowej wywołanego zmiennym i udarowym zginaniem*, Biuletyn WAT, 9 (1972) 33 - 39.
3. S. KOCAŃDA, *Zmęczeniowe niszczenie metali*, WNT, Warszawa 1972.
4. S. KOCAŃDA, J. KOZUBOWSKI, *Ermüdungsrisserverlauf und Fraktographie von Ermüdungsbrüchen in Aluminium — und Kupferlegierungen*, 3 International Congress on Fracture, München 1973, T. IV, Ref. III-225.
5. S. KOCAŃDA, J. KOZUBOWSKI, *Ermüdungsbrüche von Ausscheidungen in Aluminiumlegierungen*, Zeitschrift f. Metallkunde, 6 (1974) 453 - 456.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WARSZAWA  
POLITECHNIKA WARSZAWSKA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 27 listopada 1974 r.*