

**MECHANOAKUSTYCZNE BADANIA PROCESÓW
STARZENIOWYCH W PORCELANIE
ELEKTROTECHNICZNEJ RODZAJU C 120**

Przemysław RANACHOWSKI

*Zakład Wytrzymałości Materiałów
IPPT PAN*

Plan prezentacji

- źródła i konsekwencje procesów degradacji w porcelanowych tworzywach elektrotechnicznych
- Koncepcja mechanoakustycznej metody bada procesów degradacji materiałów ceramicznych
- Główne rodzaje tworzyw porcelanowych stosowanych w elektroenergetyce
- Badania procesów degradacji w tworzywie wysokoglinowym rodzaju C 120
- Podsumowanie i wnioski

Tworzywa ceramiczne, a zwłaszcza porcelana elektrotechniczna różnego rodzaju znajduje od lat szerokie zastosowanie w produkcji odpowiedzialnych elementów elektroizolacyjnych. W przypadku tych wyrobów, obok wysokiej dynamicznej wytrzymałości mechanicznej, wymagany jest długi okres bezawaryjnej eksploatacji. Zapewnienie tego uwarunkowane jest trwałością, a zatem długotrwałą wytrzymałości tworzywa ceramicznego. Ocena trwałości eksploatacyjnej materiału oparta jest przede wszystkim na analizie powstawania i rozwoju z upływem czasu procesów degradacji w strukturze czerepu.

Proponowana metoda mechanoakustyczna wraz z badaniami mikroskopowymi oraz ultradźwiękowymi służy rozpoznaniu i udokumentowaniu mechanizmu degradacji tworzyw ceramicznych.

Przez termin starzenia rozumie się w technice postępującą z upływem czasu degradację właściwości użytkowych elementów lub większych układów.

W przypadku tworzyw ceramicznych, procesy starzeniowe polegają na stopniowym powiększaniu się rozmiarów defektów, na drodze kruchych pęknięć, pod wpływem istniejących w materiale naprężeń mechanicznych. Stanowią one sumę naprężeń wewnętrznych oraz naprężeń wywołanych siłami zewnętrznymi. Wzrost wielkości mikropęknięć w czerepie następuje powoli. Proces ten prowadzi jednak po dłuższym czasie do rozwoju mikropęknięć w pęknięcia, o wymiarach krytycznych dla obciążeń eksploatacyjnych.

Po wypaleniu, w następstwie studzenia, w układzie pozostają trwałe naprężenia mechaniczne. W zależności od skali można podzielić je na:

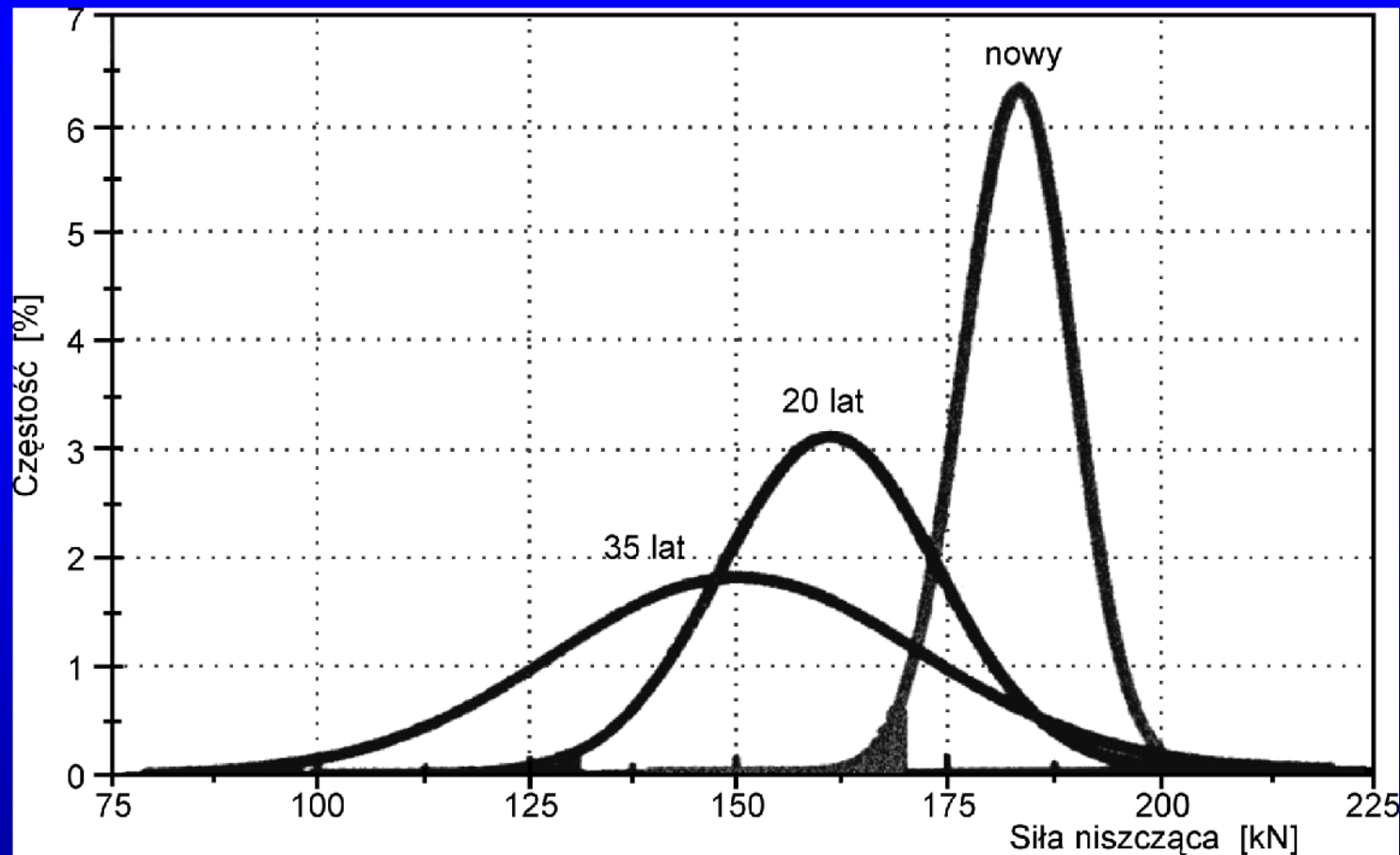
- Naprężenia w mikroobszarach otaczających ziarna kwarcu, które wywołane są dużą różnicą współczynników rozszerzalności termicznej kwarcu i otaczającej go fazy szklistej ($12,3 \cdot 10^{-6}$ wobec $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Istotne znaczenie ma efekt skurczu ziarn przy przemianie polimorfu kwarcu α w β – 2,4% przy 573°C .
- Naprężenia w skali pół-makro, powodowane anizotropią struktury (najczęściej jednokierunkową), jaka tworzy się przy formowaniu płoszki masy porcelanowej w odpowietrzającej prasie pasmowej.
- Naprężenia w skali makro pomiędzy wnętrzem, a obszarami zewnętrznymi izolatora. Są one wywołane gradientem temperatury, jaki występuje przy studzeniu między powierzchnią a wnętrzem izolatora.
- Naprężenia ściskające w szkliwie i rozciągające w przyległej warstwie czerepu. Wywołane są one w sposób zamierzony i mają na celu podwyższenie wytrzymałości izolatora i odporności szkliva na pęknięcia.

Dziadkowiec J., Kupiec E., *Procesy starzeniowe w izolatorach ceramicznych*, Energetyka, 5, 1992, 166-170.

Kordek M. i inni, *Analiza celowości stosowania porcelany rodzaju 130 do wytwarzania izolatorów elektroenergetycznych o najwyższym poziomie jakości i niezawodności*. Opracowanie Instytutu Energetyki, Zespołu ds. Przepisów, Normalizacji i Certyfikacji, nr DPN/02/E/97, Warszawa 1998, Rozdz. 2.

Naprężenia wewnętrzne są dostatecznie wysokie, by z upływem czasu, bez udziału zewnętrznych obciążeń eksploatacyjnych, powodować stopniowy wzrost już obecnych mikropęknięć oraz powstawanie nowych. Dotyczy to zwłaszcza granic i w drugiej kolejności – samych ziarn kwarcu.

Najwyższą wartość naprężenia wewnętrzne mają krótko po wypaleniu. Oddziałują one w mikroobszarach ośrodka kruchego i nie mogą ulegać relaksacji na drodze deformacji plastycznej. Ich relaksacja dokonuje się zatem poprzez rozwój i powstawanie kolejnych mikropęknięć. Powoduje to spadek wytrzymałości mechanicznej tworzywa, a w konsekwencji całego obiektu. Efekt ten zachodzi bez działania obciążeń zewnętrznych. Dzieje się tak gdy naprężenia eksploatacyjne nie przekraczają $0,3 \div 0,5$ wartości niszczącej. Jeśli obciążenia zewnętrzne są wyższe, efekty degradacji tworzywa ulegają wyraźnej intensyfikacji.



Z upływem czasu maleje rednia wytrzymałość izolatorów. Po 20 latach – z wyjściowej wartości 183 do 161 kN – spadek o 12%. Po 35 latach do 150 kN – spadek o 18%. Jednocześnie nie rośnie rozrzut uzyskanych wartości. Po 20 latach wzrasta on o 94%, natomiast po 35 latach jest trzykrotnie większy – wzrost o 206%.

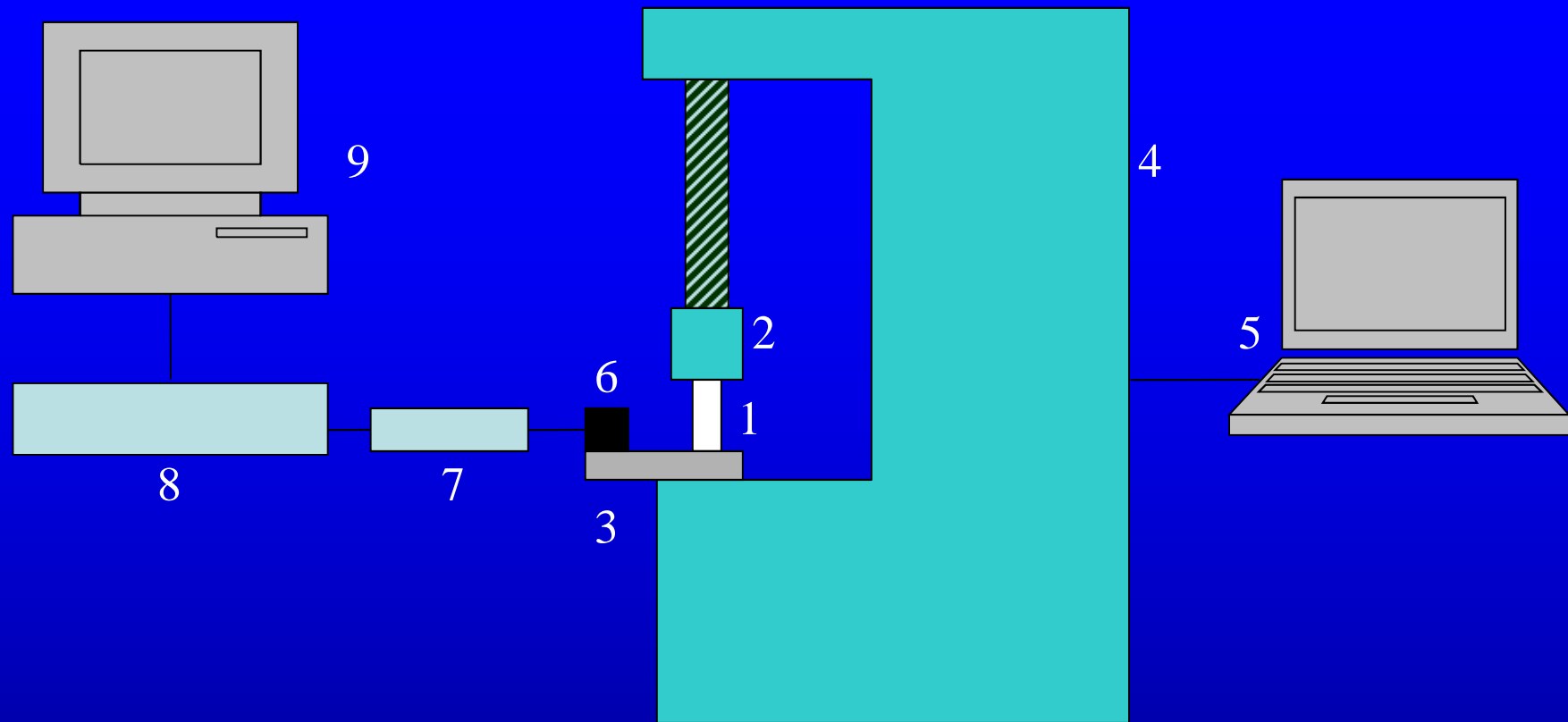
Frese H.J., Pohlmann H., *Operating Experience with, and Investigations of Long Rod Insulators*, Elektrizitätswirtschaft, H. 22, 1999, 38-43, (authorized translation of the report).

Liebermann J., *Avoiding Quartz in Alumina Porcelain for High-Voltage Insulators*, Am. Ceram. Soc. Bull., 80, 6-7, 2001, 37-48.

Idea prezentowanej metody polega na badaniu technik emisji akustycznej (EA) oraz analizy mikroskopowej (MO, SEM) próbek ceramicznych, poddanych wolno narastającym naprężeniom ciskającym. Badania prowadzono na prostopadłościennych próbkach wyciętych z izolatorów sieciowych.

Wieloletnie badania, prowadzone głównie na porcelanie rodzaju C 120, wykazały wyraźne analogie pomiędzy efektami oddziaływania na tworzywo wieloletnich obciążeń eksploatacyjnych oraz wolno narastających naprężających w relatywnie krótkotrwałej próbie laboratoryjnej.

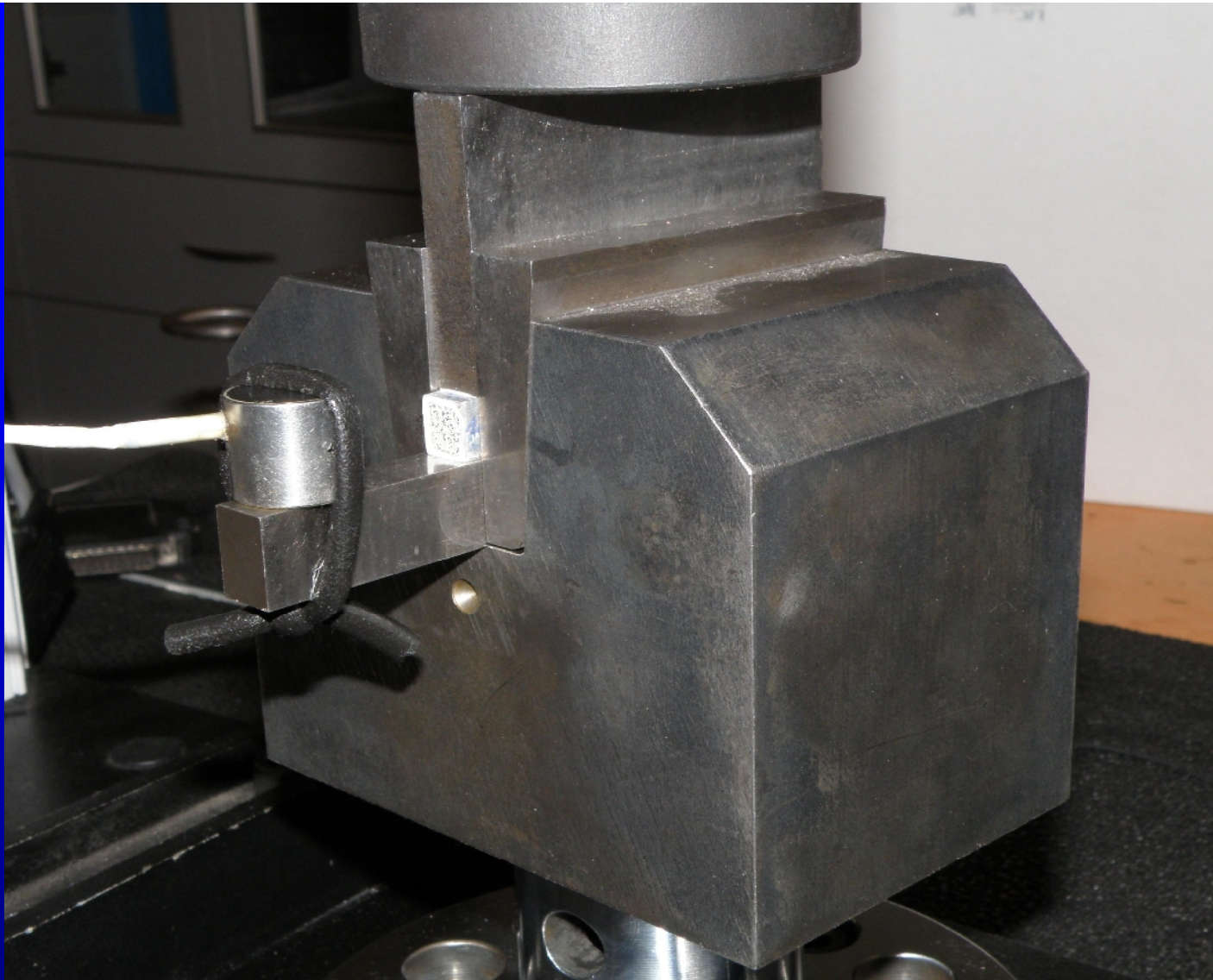
Inicjacja i wzrost mikropęknięć należą do głównych źródeł sygnałów akustycznych w ośrodkach kruchych, do których należą tworzywa ceramiczne. Sygnały EA pojawiają się już przy niskich naprężeniach progowych, gdy generacja mikropęknięć w materiale nie daje się praktycznie wykryć innymi metodami.



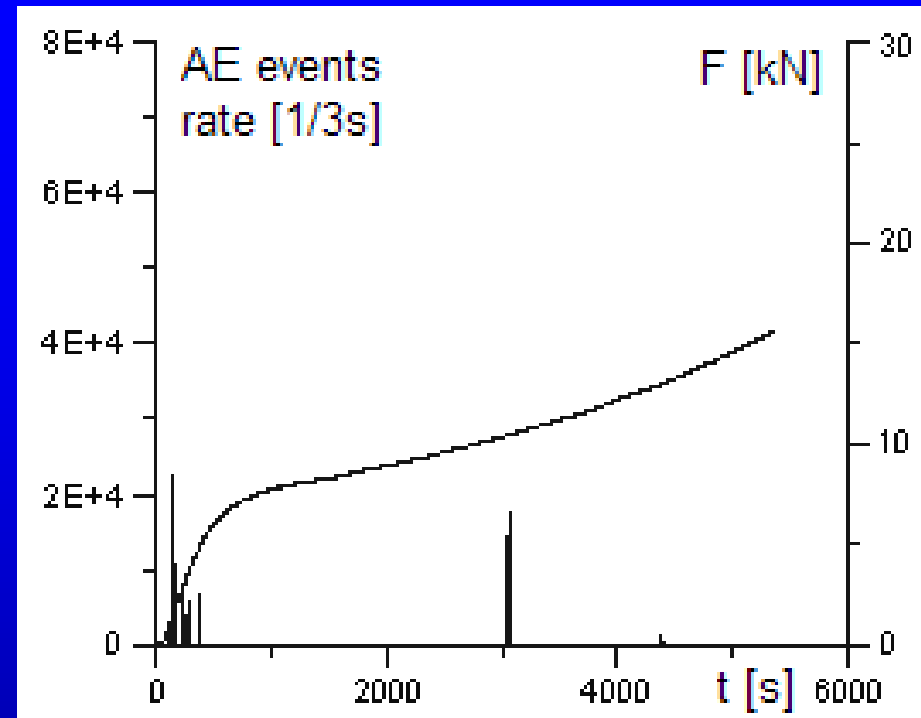
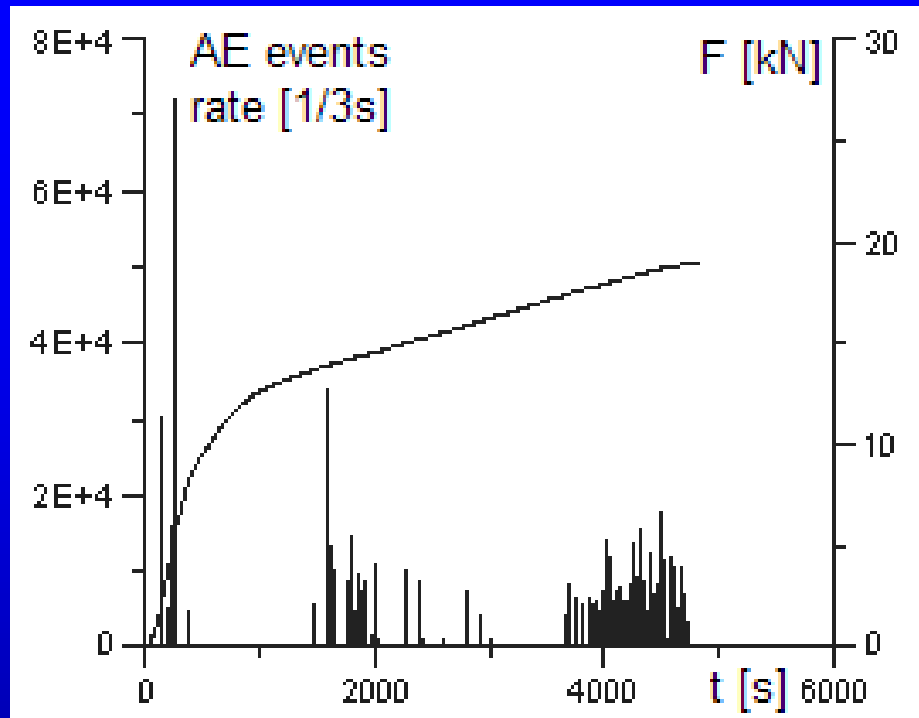
Schemat dwutorowego układu pomiarowego do mechaniczno-akustycznych badań próbek: 1 – kształtka ceramiczna, 2 – trawersa maszyny wytrzymałościowej, 3 – stalowa podstawa pełni ca funkcję falowodu akustycznego, 4 – maszyna wytrzymałościowa INSTRON 3382, 5 – komputer sterujący pracą maszyny, 6 – przetwornik EA (szerokopasmowy typu WD PAC), 7 – przedwzmacniacz, 8 – analizator EA, 9 – komputer rejestrujący deskryptory EA.



Układ pomiarowy do mechaniczno-akustycznych badań próbek; 1 – analizator EA, 2 – szerokopasmowy przetwornik sygnałów EA, 3 – elementy mocujące próbki.



Widok układu mocuj cego próbk , który pozwala na równoosiowe przenoszenie napr enia ciskaj cego. Stalowa podstawa, z widocznym przetwornikiem EA, pełni funkcj falowodu sygnałów akustycznych.



Przebieg tempa zdarze EA w funkcji siły podczas nieswobodnego ciskania (channel-die) próbki stopu Mg12Li o strukturze gruboziarnistej (kilkaset mikrometrów) oraz drobnoziarnistej (kilka mikrometrów).

Zwraca uwagę na liczbę sygnałów oraz zanik trójetapowego mechanizmu procesu odkształcania. Punkt plastyczny występuje przy niższej sile ciskającej.

Prędkość przyrostu naprężenia wpływa w istotny sposób na rejestrowane charakterystyki mechaniczno-akustyczne próbek. Prędkość tych zmian stanowi czynnik wpływający na aktywność akustyczną. Charakter tej zależności jest nieliniowy i trudny do oszacowania.

Pomiar deskryptorów EA powinien odbywać się przy możliwie powolnym przyroście odkształcenia – rzędu 10^{-2} mm/min. Pozwala to w dużym stopniu uniezależnić pomiary EA od wpływu warunków eksperymentalnych na obraz procesu degradacji materiału. Jednocześnie, proces degradacji struktury ma charakter quasi-statyczny. Tak prowadzony pomiar lepiej przybliży zmiany starzeniowe w warunkach eksploatacyjnych.

Wy sze pr dko ci odkształcenia, rz du 10^0 mm/min, sprzyjaj inicjacji i propagacji p kni poprzez ziarna i wydzielenia faz krystalicznych. Przy niskich pr dko ciach, proces relaksacji napr e zachodzi wzdłu granic osnowy i krystalicznych składników czerepu. Badania mikroskopowe tworzyw porcelanowych izolatorów po wieloletniej eksploatacji wykazały obecno p kni o takim wła nie charakterze. Potwierdza to konieczno stosowania mo liwie niskich pr dko ci przyrostu odkształcenia do badania długotrwałej wytrzymało ci materiału.

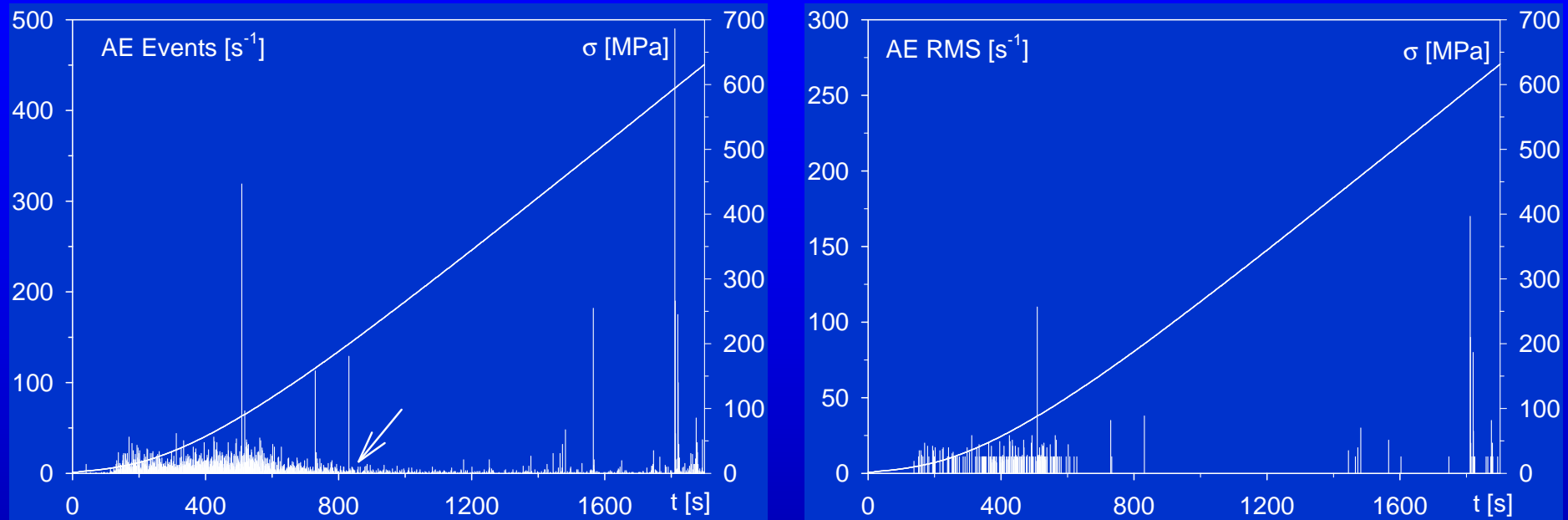
Pr dko odkształcenia ma znaczny wpływ na wytrzymało mechaniczn próbek, jak równie rozrzut otrzymywanych wyników.

Zalecono wytrzymałości próbek porcelany C 130 od prędkości przyrostu naprężenia w próbie zginania trójpunktowego.

Prędkość wzrostu odkształc. [mm/min]	0,001	0,01	0,1	1
Liczba próbek	20	20	20	30
Zakres wytrzymałości próbek [MPa]	79,2÷121,6	80,4÷148,5	100,4÷150,2	102,3÷150,9
średnia wytrzymałość [MPa]	104,6	111,7	124,0	127,4
Odchylenie standardowe [MPa]	10,6	22,6	16,1	12,6
Rozrzut względny [%]	40,5	61,0	40,2	38,1

$$\text{Rozrzut wzgl.} = 100 \% \times (\text{warto}_{\text{max}} - \text{warto}_{\text{min}}) / \text{warto}_{\text{rednia}}$$

Wybór deskryptora emisji akustycznej

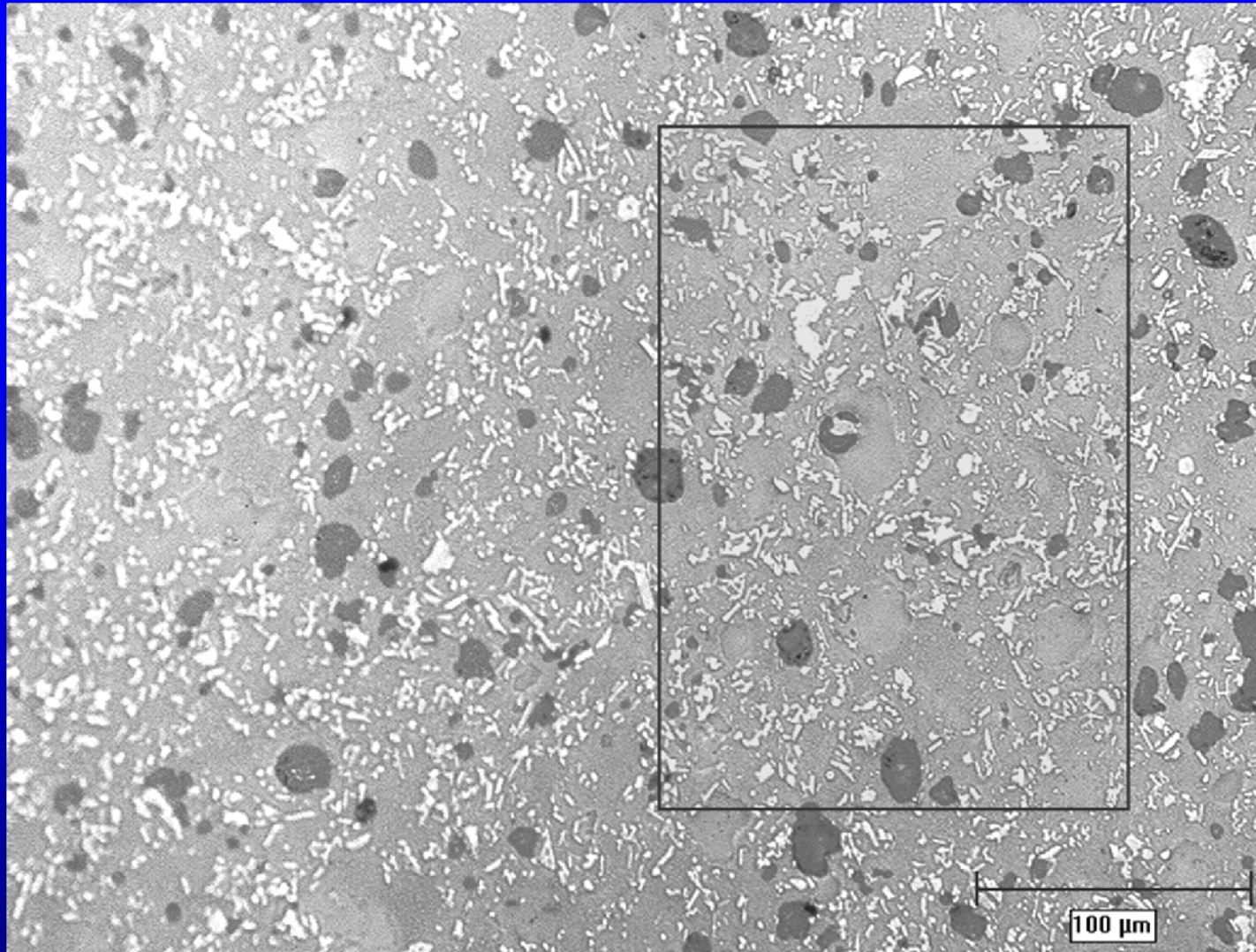


Typowy przebieg tempa zdarze oraz tempa RMS w funkcji wzrostu napr enia ciskaj cego rejestrowany dla próbki porcelany C 130 o wytrzymało ci 635 MPa. Przedstawiono jedynie wst pny i podkrytyczny etap degradacji w zakresie 0 ÷ 631 MPa.

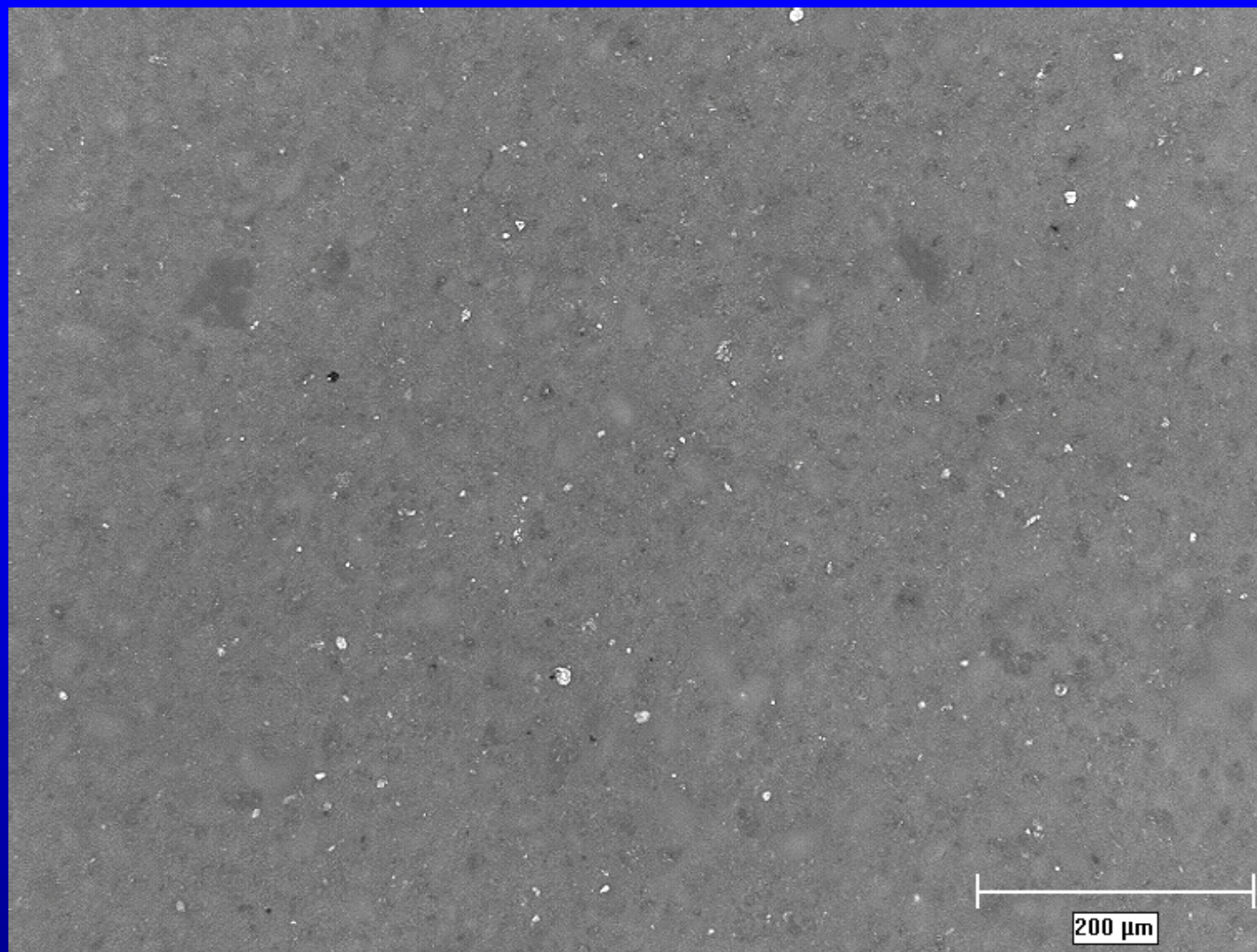
W przypadku materiałów glinokrzemianowych rejestruje si du ilo sygnałów o niskiej energii. Wykorzystanie deskryptorów opartych na rejestracji energii sygnałów mo e powodowa pomini cie du ej ich cz ci, nawet przy niskim poziomie dyskryminacji.

Mikroskopowa analiza efektów degradacji wymaga szczególnej procedury przygotowania powierzchni obserwacyjnych próbek. W przypadku materiałów glinokrzemianowych stosuje się zwykle polerowanie mechaniczno-chemiczne koloidalną krzemionką, w obecności NaClO . Jakkolwiek metoda jest nowoczesna i efektywna, dla próbek badanych metod mechaniczno-akustycznych okazała się niewystarczająca.

Lepsze efekty uzyskuje się zalewając próbki specjalnymi żywicami epoksydowymi i stosując następnie kilkuetapowy proces polerowania zawiesinami diamentowymi i krzemionkowymi. Pozwala to na obniżenie ilości wykruszonych w czasie przygotowania zglądów elementów struktury o przeszło 40%.



Wyjściowy obraz porcelany rodzaju C 130 w powiększeniu 200 razy. Zgład wykonany metodą mechaniczno-chemiczną. Wkruszone elementy struktury obejmują 7,0% - całą zawartość stłuczki (około 5%) oraz znaczną fazę kwarcową.

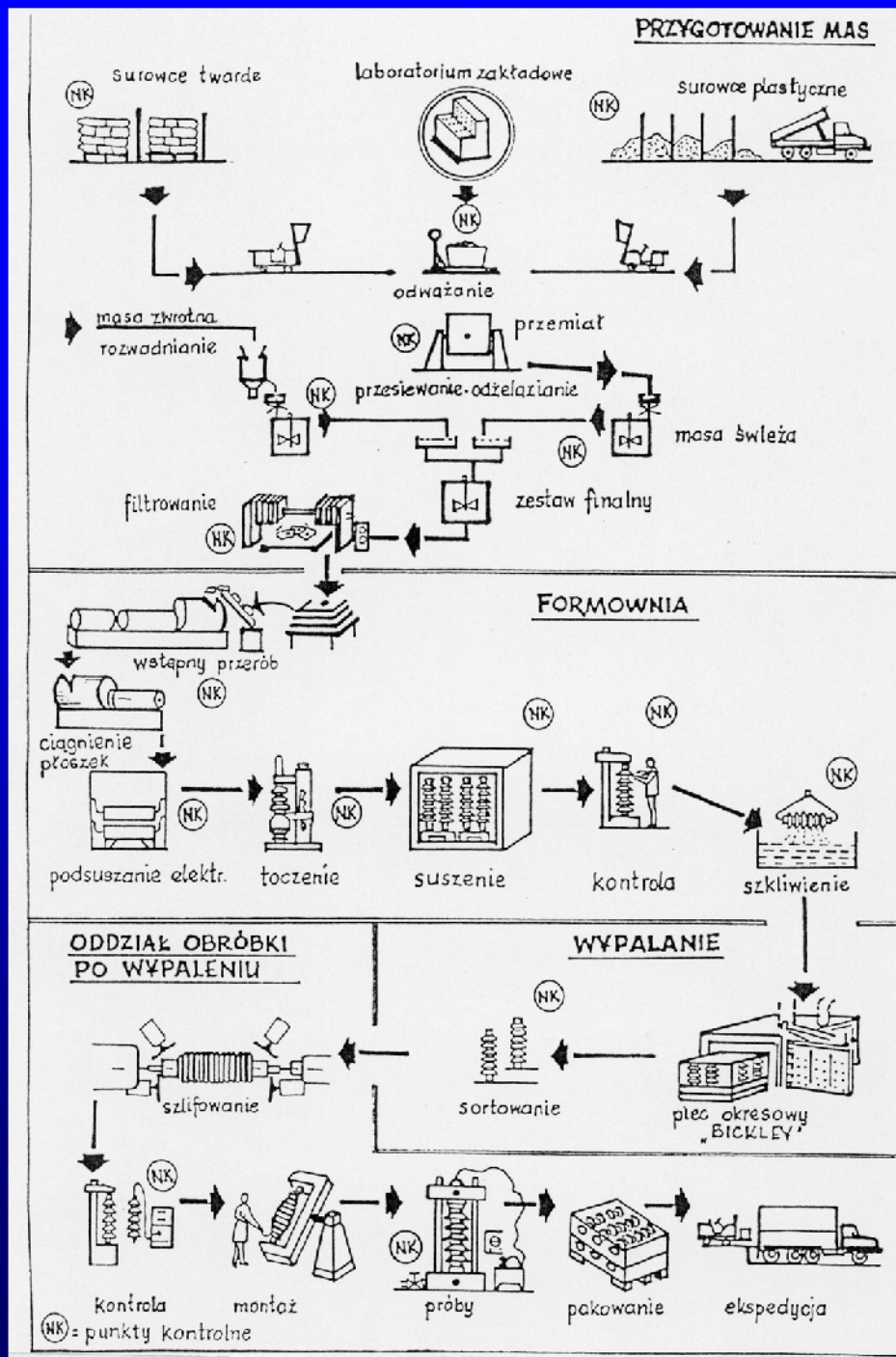


Obraz tego samego tworzywa w powiększeniu 100 razy. Zgład przygotowany z wykorzystaniem żywicy epoksydowej. Jasne **drobiny stłuczki** uwidocznione w kontraście interferencyjno-fazowym Nomarskiego przy polaryzacji widma światła szarego. Stanowi one 2,6% z całkowitej ilości około 5%. Wykruszone elementy struktury zajmują **4,1%** powierzchni.

Typowy skład surowcowy mas porcelanowych w procentach.

Surowce	C 110	C 120	C 130
Kaoliny	30 - 38	34 - 36	18 - 30
Gliny plastyczne ogniotrwałe	12 - 20	20 - 23	15 - 22
Skalenie	20 - 26	23 - 26	18 - 20
Piasek kwarcowy	22 - 25 (?)	-	-
Tlenek glinu	-	20 – 25 kalcynowany	30 – 40 (?) ceramiczny

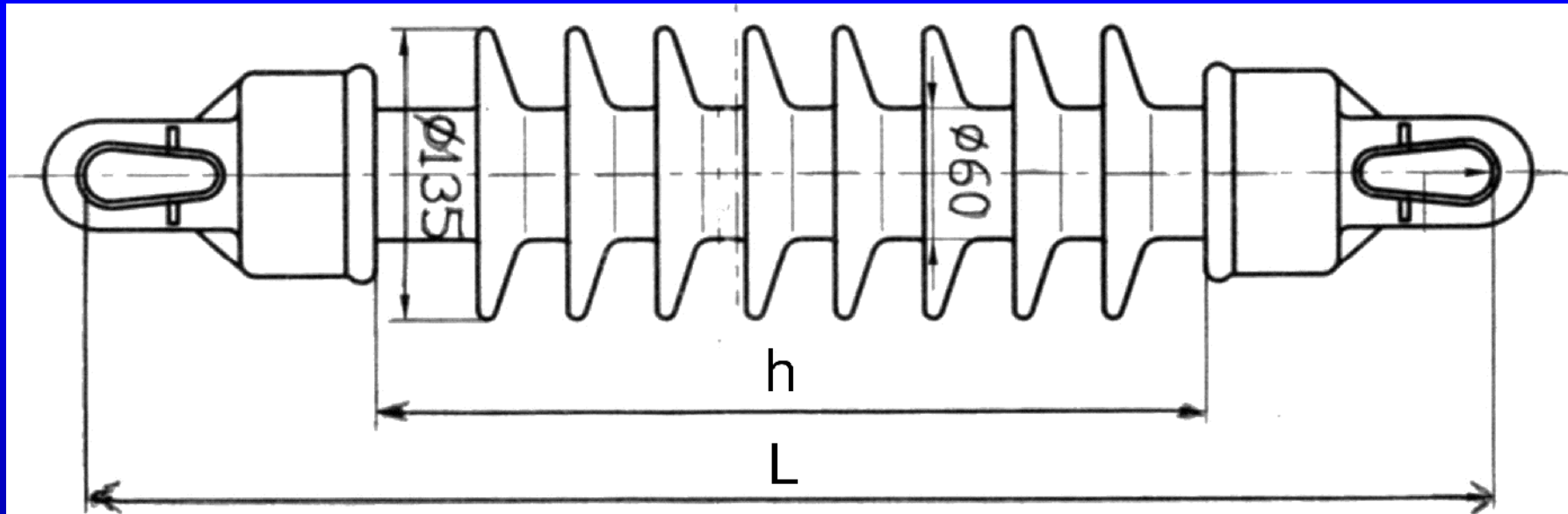
Kordek M. i inni, *Analiza celowości stosowania porcelany rodzaju 130 do wytwarzania izolatorów elektroenergetycznych o najwyższym poziomie jakości i niezawodności*. Opracowanie Instytutu Energetyki, Zespołu ds. Przepisów, Normalizacji i Certyfikacji, nr DPN/02/E/97, Warszawa 1998, Rozdz. 2.



Schemat produkcji izolatorów na przykładzie ZPE ZAPEL S.A. w Boguchwale.

W prezentacji przedstawiono wyniki badań mekhano-akustycznych nowoczesnego tworzywa rodzaju C 120. Materiał pochodził z czterech odcinów fragmentów pnia izolatora liniowego SN typu LP 60/8 produkcji krajowej z 1999 roku. Izolator pobrany został z magazynu i nie był eksploatowany na linii.

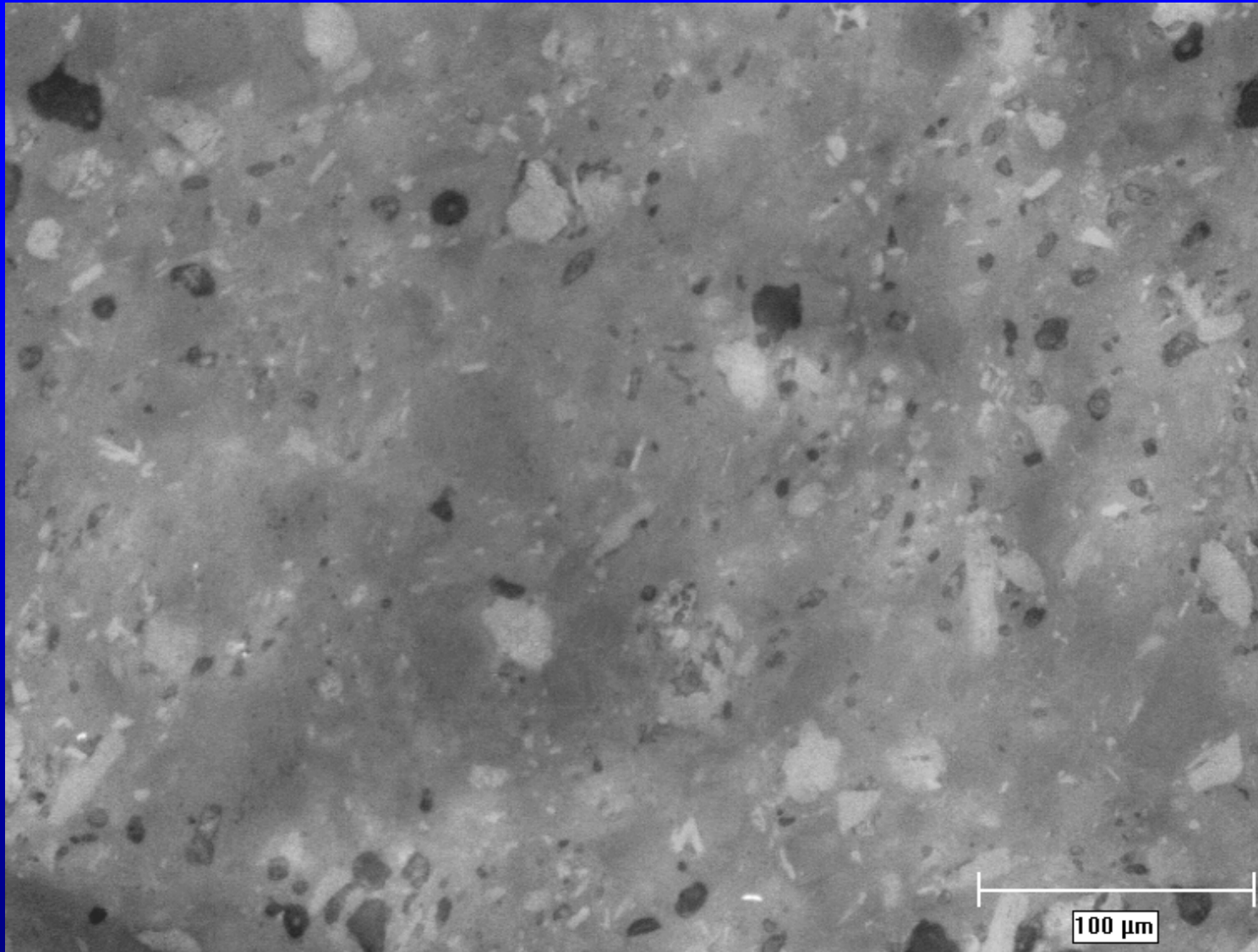
Badana była budowa fazowa materiału, oznaczonego jako **MG** oraz efekty oddziaływania wolno narastających naprężeń ciskających na strukturę tworzywa. Celem badań było ustalenie etapów degradacji tworzywa na podstawie badań próbek, których obciążenie zatrzymywane było dla różnych wartości naprężeń ciskających, w zakresie 100 ÷ 541 MPa. Wyniki badań odniesiono do wyników uzyskanych dla typowego tworzywa rodzaju C 120 oraz słabszej porcelany rodzaju C 130.



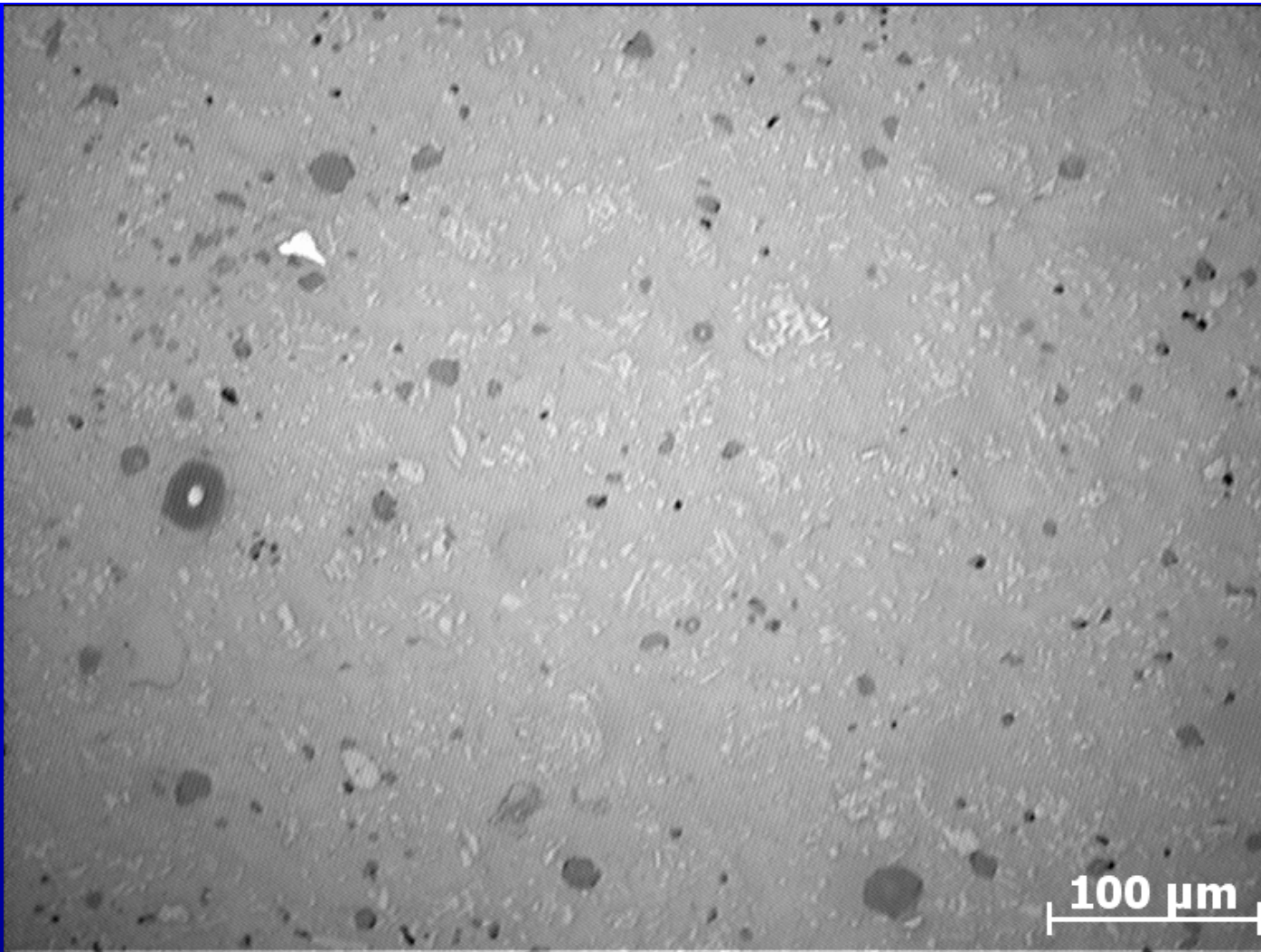
Izolator liniowy SN typu LP 60/8. Długość między okuciami $h = 370$ mm, $L = 635$ mm, średnica pnia $\phi = 60$ mm, średnica kloszy $\phi = 135$ mm, droga upływu – 800 mm, liczba kloszy – 8, masa – 9,0 kg, znamionowa wytrzymałość na rozciąganie – 60 kN.

Zestawienie wyników badań wybranych parametrów typowego tworzywa rodzaju C 120 (krajowe izolatory liniowe WN), materiału MG oraz porcelany rodzaju C 130 produkcji zagranicznej.

Parametr - symbol i jednostka	Typowe krajowe tworzywo C 120	Tworzywo MG	Tworzywo C 130, prod. zagran.
Gęstość pozorna ρ [g/cm ³]	2,41	2,44	2,51
Moduł Younga E [GPa]	79	86	96
Prędkość fal podłużnych c_L [m/s]	6180	6420	6660
Prędkość fal poprzecznych c_T [m/s]	3660	3780	3930
Amplitudowy współcz. tłumienia α [dB/cm]	~0,9	0,6 ÷ 1,0	0,4 ÷ 0,6



Struktura typowego krajowego tworzywa rodzaju C 120, w powiększeniu 200 razy. Widoczne są jasne ziarna kwarcu (przeszło 20%), ciemniejsze wydzielena mullitu (ponad 30%), czarne ubytki po wykruszonych ziarnach kwarcu (około 4%) oraz drobne otwarte pory (około 1%). Brak jest stłuczki, korund w ilości marginalnej.

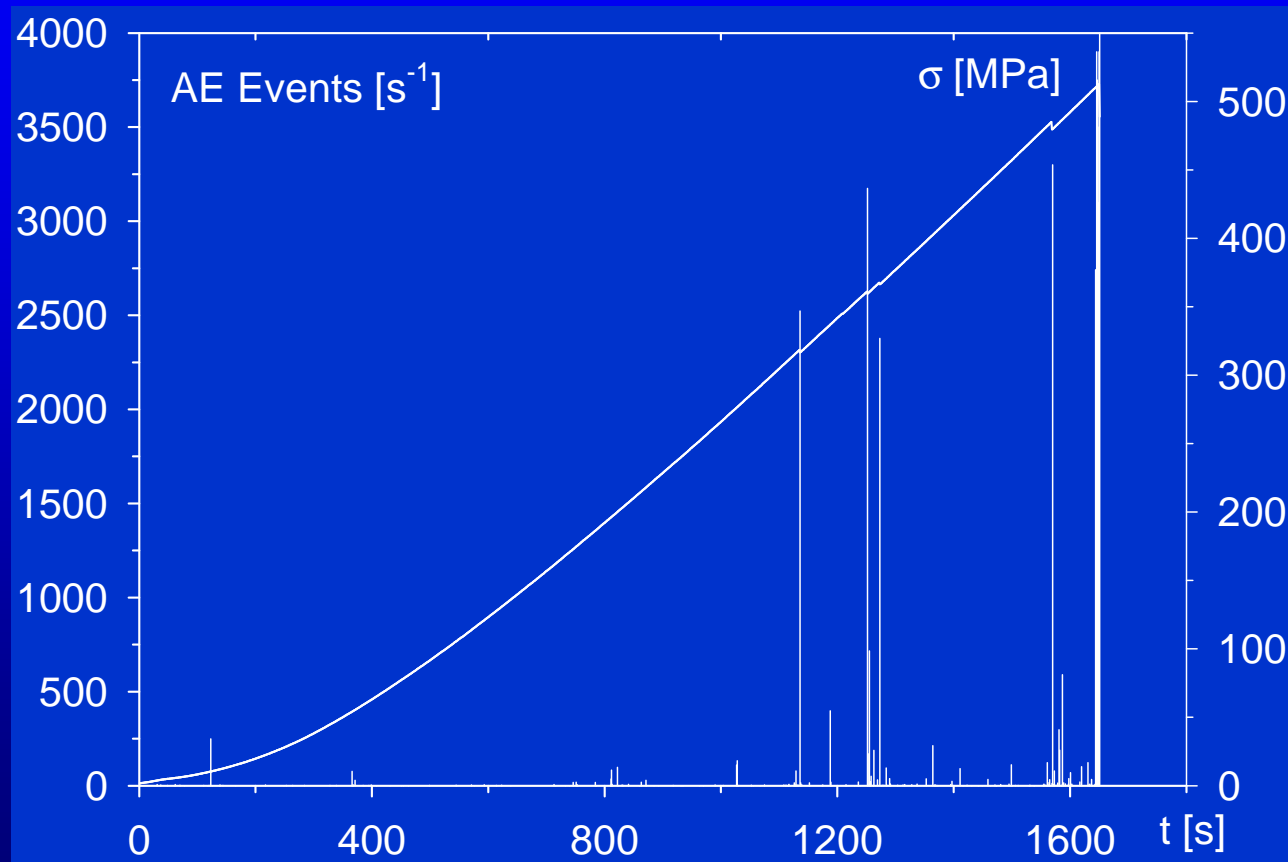


Obraz tworzywa MG w powiększeniu 200 razy. Widoczne są drobne jasne ziarna korundu (7,5%), nieco większe ziarna kwarcu (8,5%) i białe drobiny szlaczki (3%). Ciemniejsze wydzielenia mullitu (około 26%) prawie nie wyróżniają się ze szklistej matrycy (ponad 52%). Ciemne obszary (niecałe 3%) pozostały po wykruszeniu drobin szlaczki i w mniejszym stopniu ziarn kwarcu. Występują również drobne czarne pory (ułamek procenta).

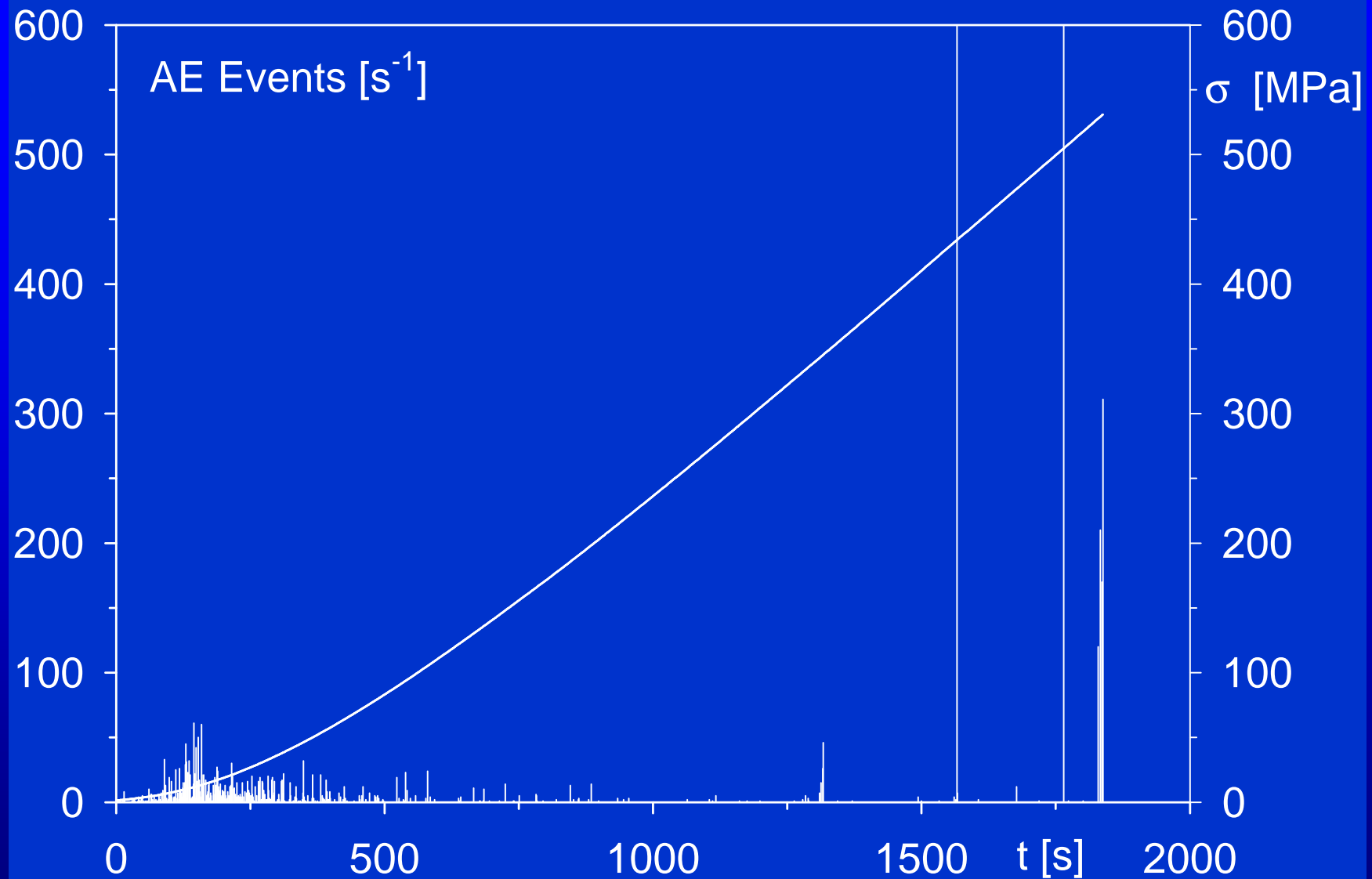
Zestawienie składu fazowego w procentach obj to ciowych typowego tworzywa rodzaju C 120 (krajowe izolatory liniowe WN), materiału MG oraz porcelany rodzaju C 130 produkcji zagranicznej.

Składnik fazowy	Tworzywo C 120 typowe	Tworzywo MG	Tworzywo C 130 zagran.
Korund	< 1	7,5	13
Kwarc	20 - 30	8,5	4
Stłuczka	-	5	4
Pory	2 - 5	< 1	< 1
Wydzielenia mulitu	30 - 35	~26	~25
Osnowa	> 40	> 52	~ 53

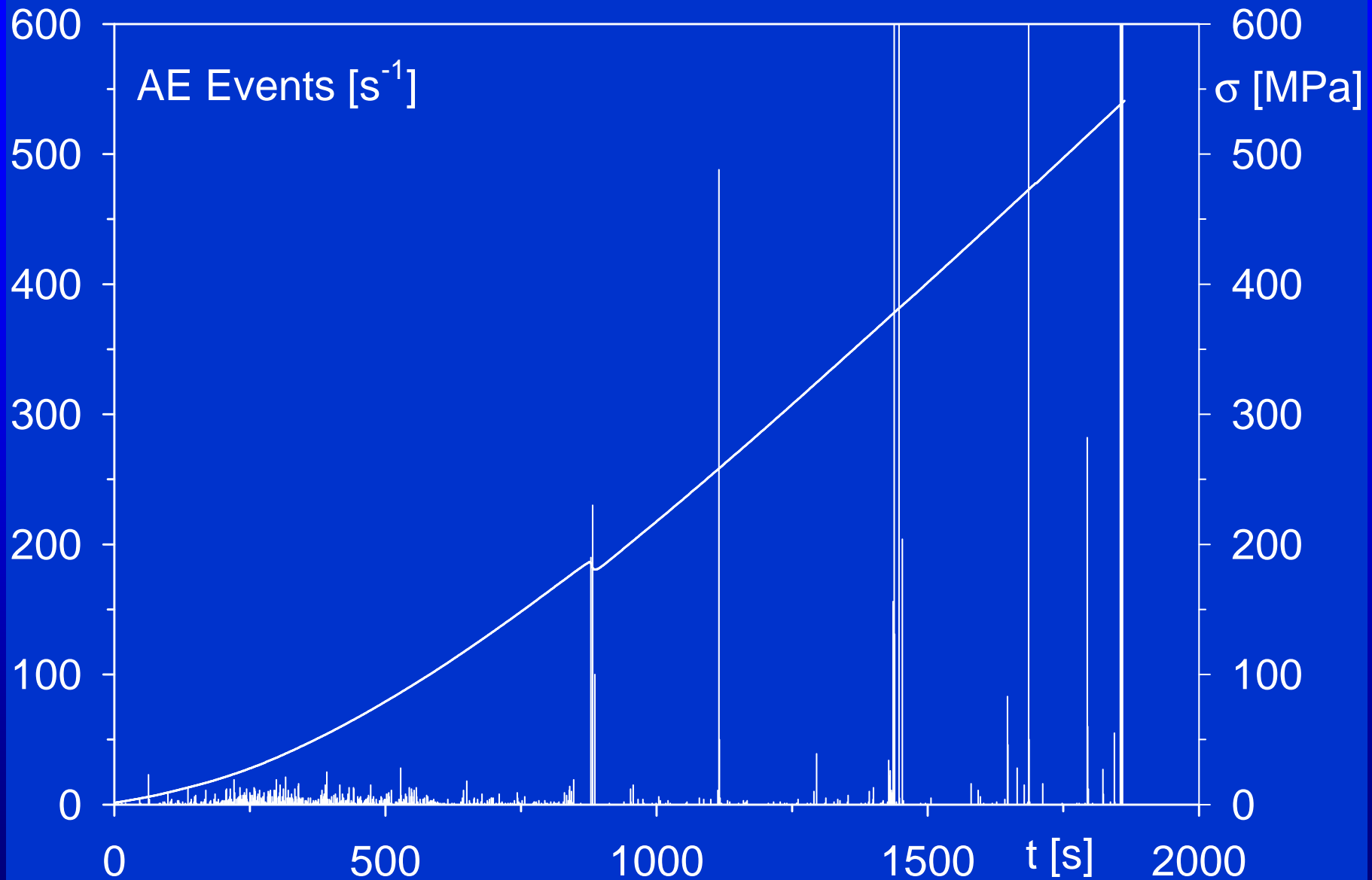
Wytrzymałość na ciskanie typowego tworzywa rodzaju C 120 z próbek małogabarytowych wynosi około 400 MPa. W przypadku tworzywa MG wytrzymałość wynosi $491 \div 563$ MPa, średnio 531 MPa, natomiast dla izolatorowego tworzywa rodzaju C 130, produkcji zagranicznej, $430 \div 735$ MPa, średnio 580 MPa.



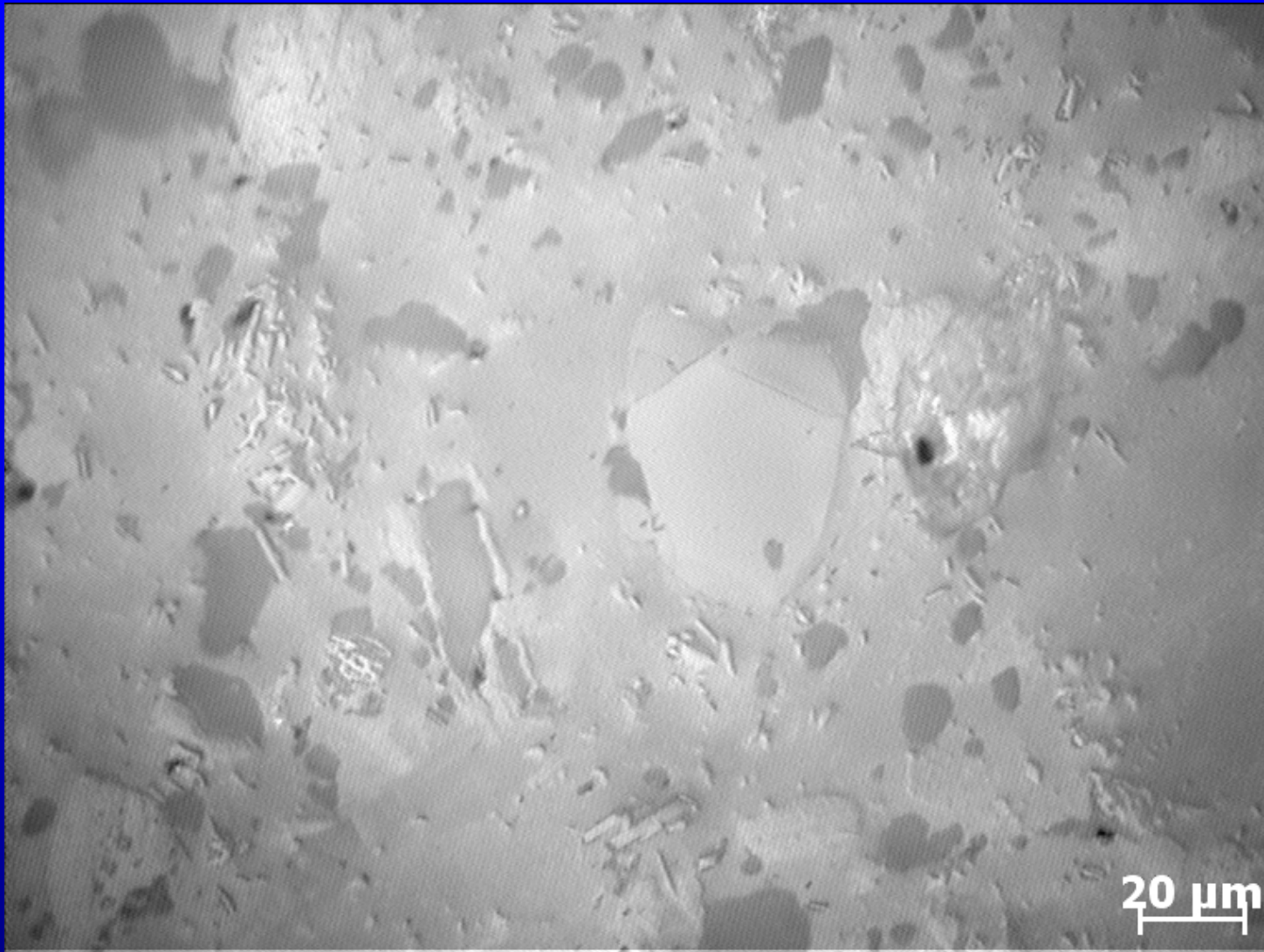
Charakterystyka mechanoakustyczna próbki tworzywa MG o wytrzymałości 512 MPa. Przedstawiono cały zakres naprężenia. Słabsze sygnały etapu wstępnego i podkrytycznego pozostają niemal niewidoczne.



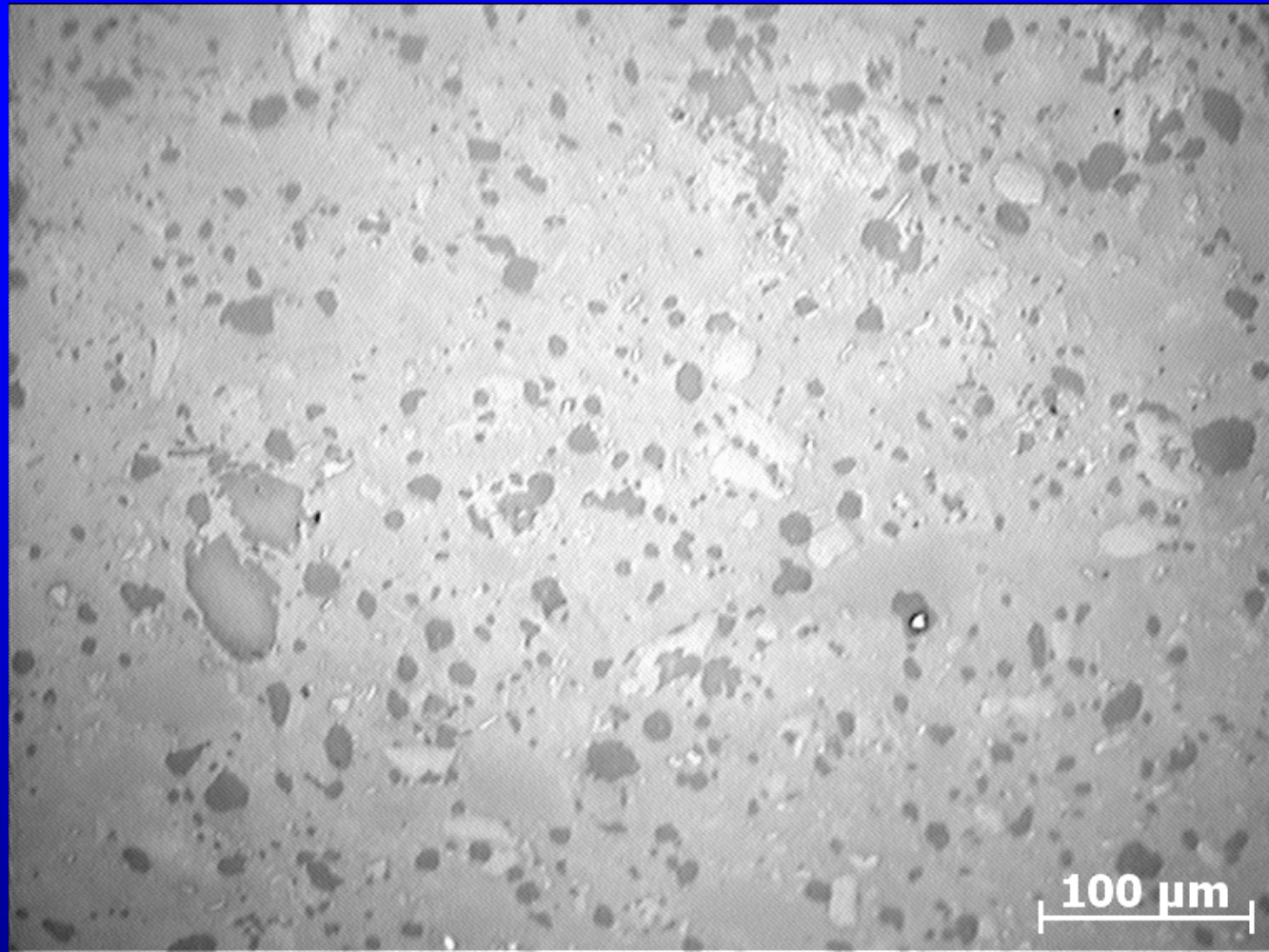
Charakterystyka mechanoakustyczna najmocniejszej próbki tworzywa MG o wytrzymałości 563 MPa. Uwidoczniono jedynie wstępny i podkrytyczny etap degradacji struktury tworzywa – do 531 MPa.



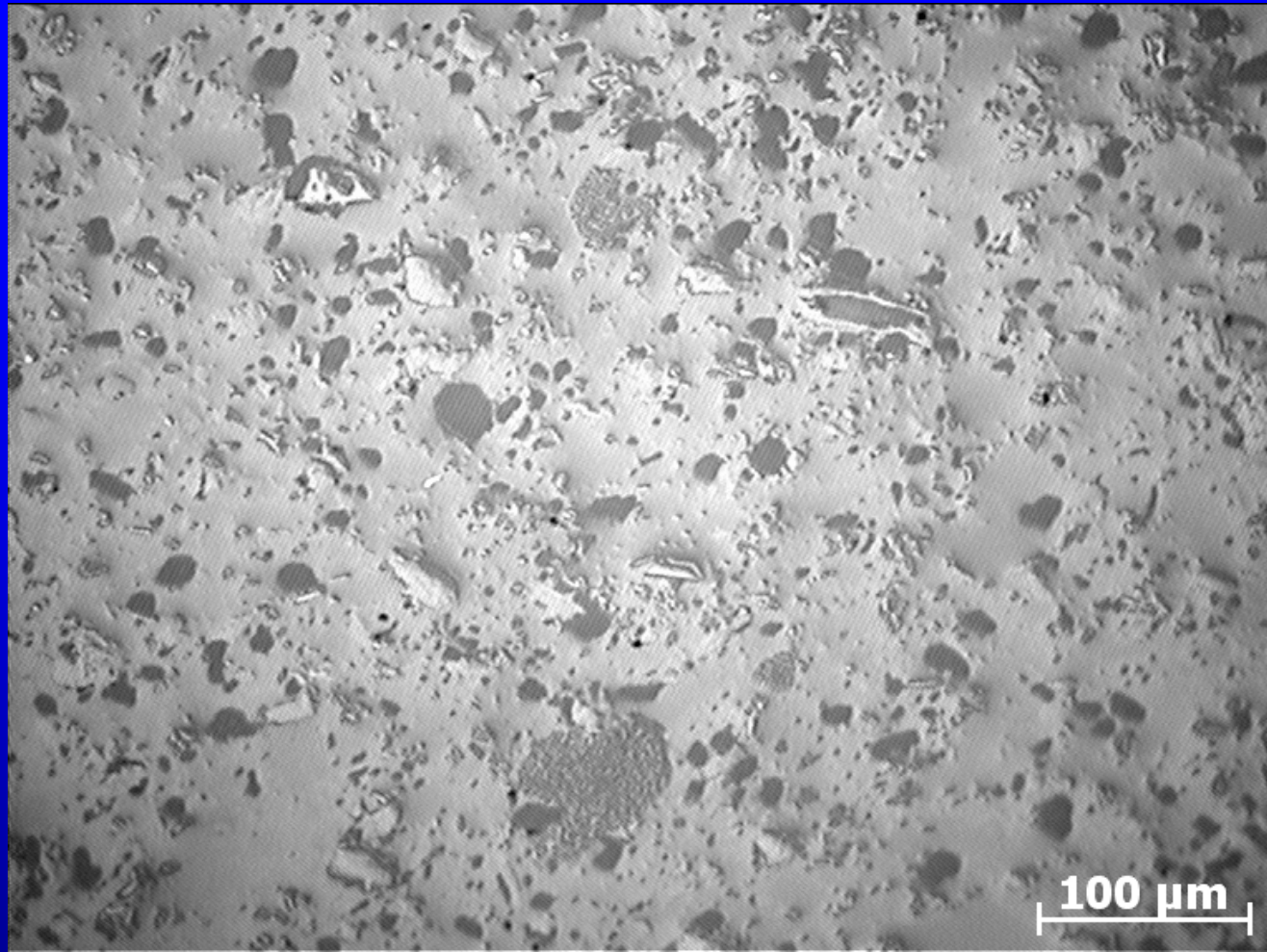
Charakterystyka mechanoakustyczna próbki tworzywa MG, której obciążenie zatrzymano przy 541 MPa, krótko przed zniszczeniem. Przedstawiono jedynie wstępny i podkrytyczny etap degradacji struktury tworzywa – do 538 MPa.



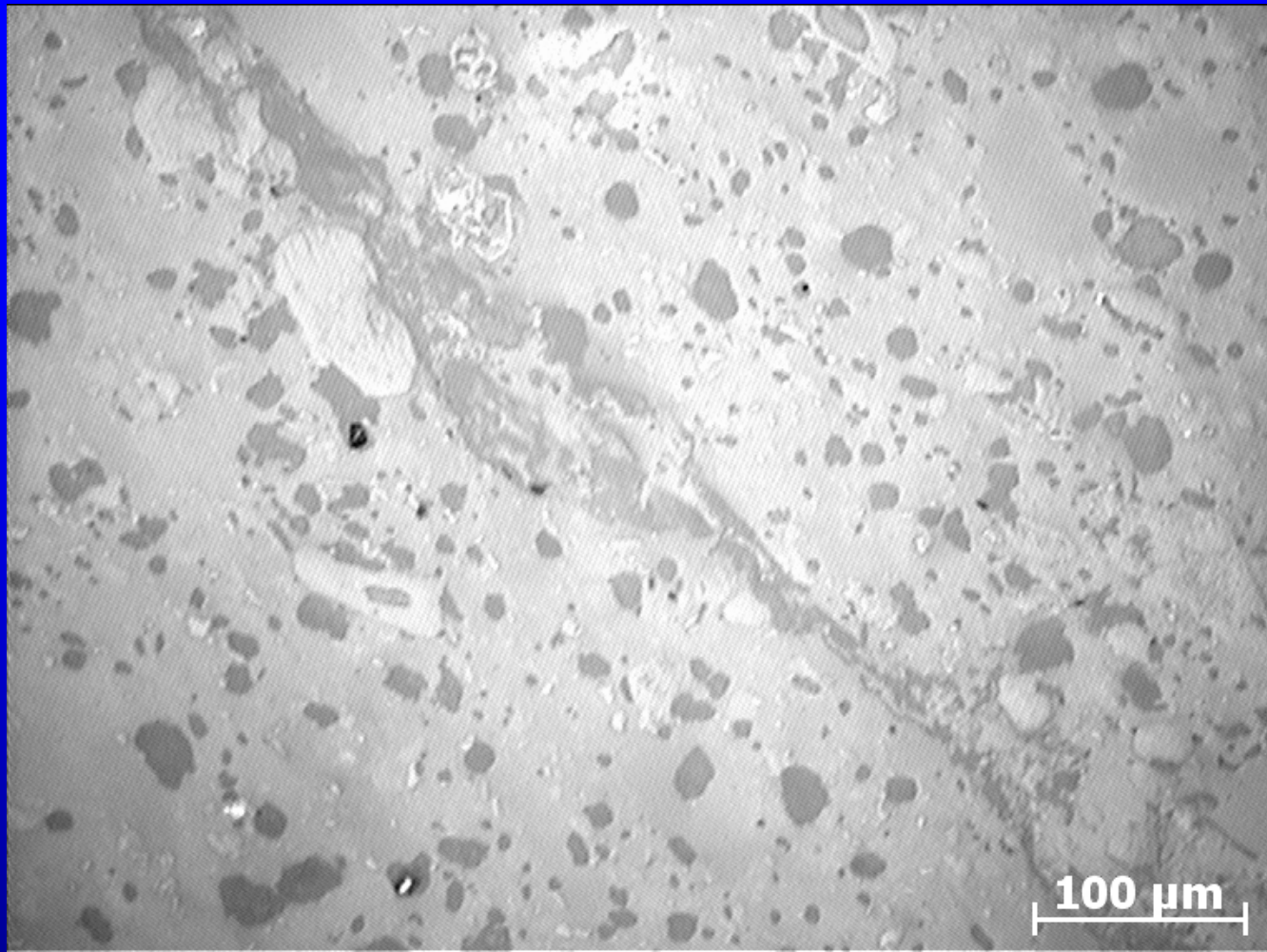
Obraz tworzywa po wst pnym etapie degradacji, w powi kszeniu 500 razy. Próbka obci ana była do 250 MPa. Zwraca uwag p kni te i cz ciowo wykruszone du e ziarno kwarcu. Ciemne obszary, które pozostały po wykruszeniu drobin stłuczki i ziarn kwarcu przekraczaj 4% powierzchni zglądu. Drobne ziarna korundu i słabo wyró niaj ce si z matrycy szare wydzielienia mulitu s nienaruszone.



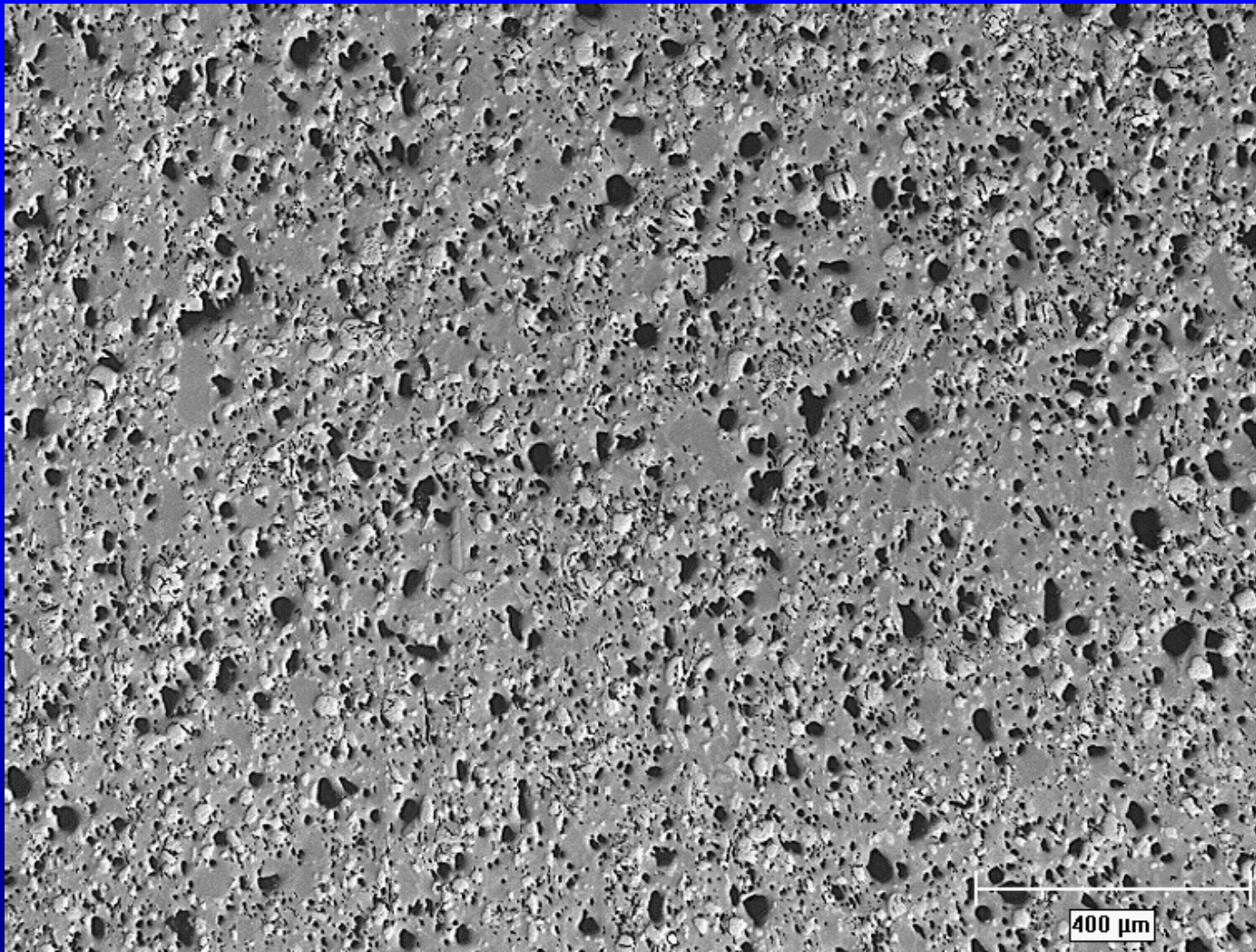
Obraz struktury brzegowej części próbki tworzywa MG, której ciskanie zatrzymano przy 460 MPa, w powiększeniu 200 razy. Stopień degradacji tworzywa jest podkrytyczny, umiarkowanie zaawansowany. Widoczne są liczne ciemne obszary po wykruszonych drobinach stłuczki i ziarnach kwarcu o różnej wielkości. Stanowi one około 7,5% powierzchni. Wiskie jasne ziarna kwarcu, które pozostały w strukturze, z reguły zawierają pęknięcia. Uszkodzenia fazy mulitowej oraz korundowej są jedynie incydentalne.



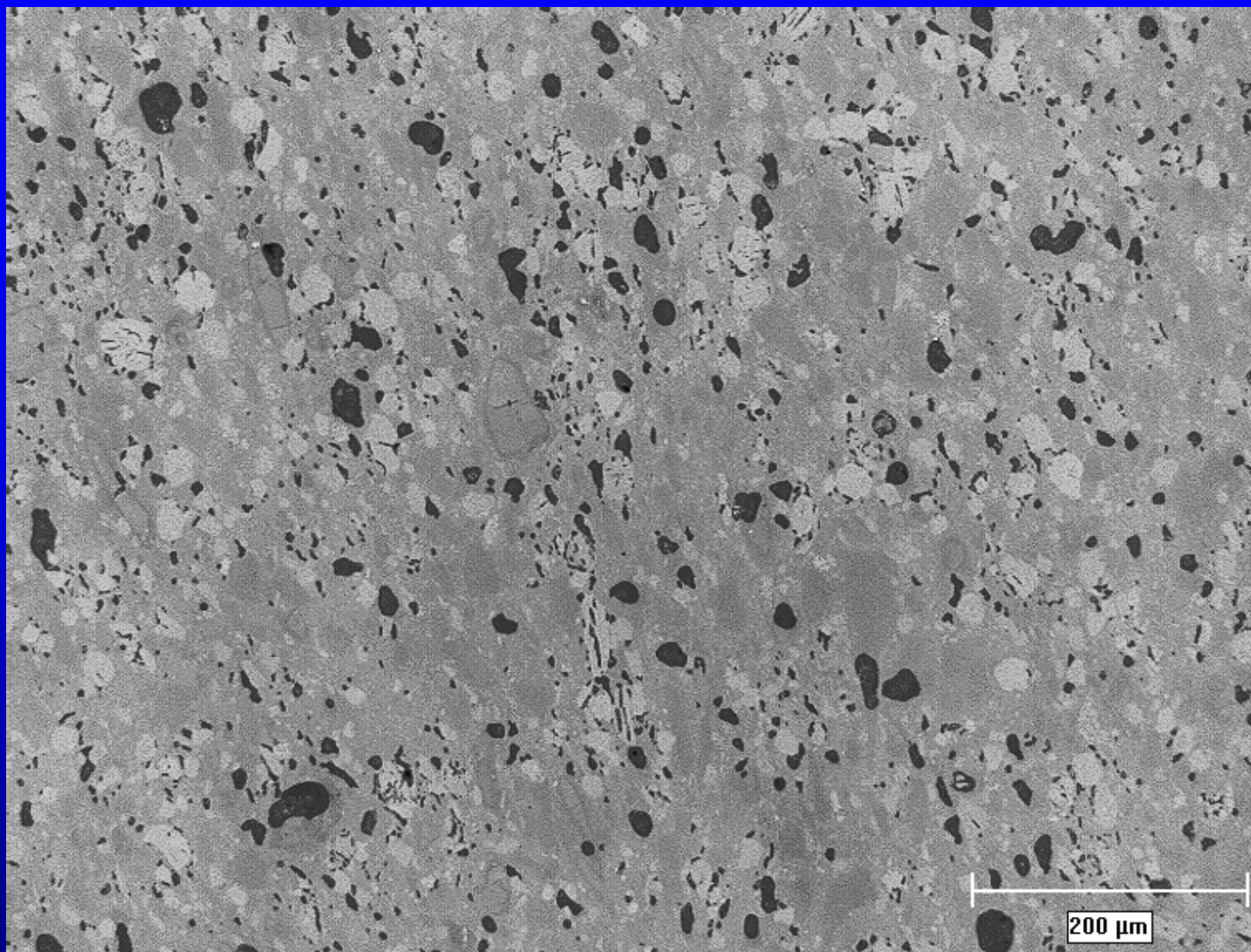
Obraz rodkowej cz. ci próbki tworzywa MG obci anej do 521 MPa, w powi kszeniu 200 razy. Stopie degradacji tworzywa jest podkrytyczny, silnie zaawansowany. Obok obszarów po wykruszonych drobinach stłuczki i ziarnach kwarcu (ponad 8% powierzchni), uwag zwracaj silnie sp kane, du e i ciemne wydzielenia mulitu. Pozostałe w strukturze ziarna kwarcu wykazuj p kni cia obrze ne i najcz ciej równie wewn trzne. Uszkodzenia fazy korundowej wyst puj sporadycznie.



Obraz struktury fragmentu zniszczonej próbki tworzywa MG, w powi kszeniu 200 razy. Stopie degradacji tworzywa jest krytyczny. Widoczne jest makrop kni cie oraz jasne, sp kane relikty kwarcowe. Ciemne pola po wykruszonych elementach czerepu przekraczaj 13% powierzchni. Zniszczeniu uległa niemal cała stłuczka. Pozostały w strukturze kwarc stanowi $0,5 \div 3\%$, z pierwotnej zawarto ci $8 \div 9\%$. Ubytek mullitu wynosi od 0,5 do przeszło 2% (z około 26%), znaczna cz wydziele zawiera jednak p kni cia. Wykruszone ziarna korundu stanowi około 1% (z $7 \div 8\%$).



Typowy obraz tworzywa pnia krajowego izolatora liniowego z 1974 roku, w powiększeniu 50 razy. Efekty degradacji struktury odpowiadają etapowi podkrytycznemu, o dużym stopniu zaawansowania. Pocztkowo zawartość kwarcu wynosiła 24,3%. Ponad 1/3 ziarn (blisko 9% powierzchni) uległa wyseparowaniu z matrycy i wykruszeniu. W siedztwie reliktyw kwarcowych obecne są liczne drobne porzki matrycy.



Typowy obraz tworzywa klosza krajowego izolatora liniowego z lat 1971-73, w powiększeniu 100 razy. Efekty degradacji struktury odpowiadają wcześniejszej fazie etapu podkrytycznego. Ubytki oraz pory stanowią po 4% powierzchni zglądu. Drobne porowatości matrycy występują o wiele rzadziej niż w obszarze pnia.

PODSUMOWANIE

Badania mechanoakustyczne, przeprowadzone na próbkach tworzyw ceramicznych różnego rodzaju, wykazały przydatność metody do rozpoznawania mechanizmu degradacji strukturalnej. Konieczne jest przy tym zastosowanie bardzo powolnego przyrostu naprężenia ciskającego oraz jednoczesny precyzyjny pomiar emisji akustycznej na specjalnie przygotowanym układzie pomiarowym. Niezbędny jest do tego optymalny dobór deskryptorów sygnałów EA – stosownie do badanego materiału.

Mikroskopowa analiza próbek, których obciążenie zatrzymuje się na różnych etapach degradacji, wymaga specjalnej preparatyki przygotowania złądów. Konieczna jest minimalizacja efektu wykruszania spękanych lub wyseparowanych z matrycy elementów struktury.

Mechanoakustyczne badania tworzyw ceramicznych wykazały obecność trzech etapów niszczenia struktury. Rejestrowany mechanizm znajduje istotne analogie do procesów starzeniowych obserwowanych w tworzywach izolatorów po wieloletniej eksploatacji.

Mechanizm degradacji tworzywa MG jest bardziej zbliżony do procesów obserwowanych w tworzywach rodzaju C 130 niż w typowych porcelanach C 120. Jest to konsekwencją budowy strukturalnej badanego materiału. Dotyczy to w szczególności obecności stłuczki, niskiej zawartości kwarcu i porów i przede wszystkim skutecznego wzmocnienia struktury ziarnami korundu i rozproszonymi w szkle igłowymi kryształami mulitu.

Materiał MG należy ocenić wysoko z punktu widzenia krótko- i długotrwałej wytrzymałości mechanicznej. Wykazuje on zdecydowanie wyższą odporność na procesy degradacji w porównaniu do typowych tworzyw rodzaju C 120. Krótkotrwała wytrzymałość mechaniczna niewiele ustępuje wartości uzyskanej w przypadku porcelany C 130 produkcji zagranicznej – 531 wobec 580 MPa.

Uwzględniając znane trwałości eksploatacyjne tworzyw rodzaju C 120 (30 ÷ 35 lat) oraz C 130 (około 50 lat), wyniki badań pozwalają ocenić trwałość porcelany MG na około 40 lat. Zatem materiał ten w pełni nadaje się do zastosowania w izolacji sieci SN₃₈

Na podstawie badań małogabarytowych próbek porcelany różnego rodzaju stwierdzono ogólne podobieństwo efektów, jakie występują przy quasi-statycznym obciążeniu próbek oraz przy wieloletnich procesach starzeniowych. Dotyczy to w szczególności degradacji materiału w następnym naprężeniu wewnętrznym, zarówno kwarcowych, jak i wynikających z defektów struktury, zwłaszcza teksturalnych.

Obciążenia eksploatacyjne o złożonym charakterze, jakie oddziałują na tworzywo pionu izolatorów liniowych, wywołują nieco bardziej złożone zmiany w tworzywie, niż obserwowane w badaniach mechanoakustycznych. Podkreślić jednak należy, że sekwencja efektów obserwowanych podczas relatywnie krótkotrwałych badań mechanoakustycznych oraz w wyniku wieloletnich procesów starzeniowych jest bardzo zbliżona.