

RENATA SUWAK*
MAREK RAWLUK**

Zastosowanie trójpunktowego zginania do badania przebiegu odkształcenia betonu ogniotrwałego w wysokiej temperaturze

Omówiono zastosowanie zginania trójpunktowego w badaniach wytrzymałościowych. Przedstawiono sposób wyznaczenia sztywności maszyny wytrzymałościowej w badaniach odkształcania próbek w wysokiej temperaturze. Podano przykłady przebiegu pęknięcia betonów ogniotrwałych w podwyższonej temperaturze. Na przykładzie betonu ogniotrwałego wykazano wpływ zmian zachodzących w osnowie betonu na pracę pęknięcia w funkcji temperatury.

1. Wstęp

Trójpunktowe zginanie jest jedną z podstawowych metod oznaczania wytrzymałości na zginanie oraz modułu sprężystości przy zginaniu, umownej granicy plastyczności i odkształcenia przy zginaniu. Wytrzymałość na zginanie przedstawia największe naprężenia powstające w materiale w chwili złamania.

Znanych jest wiele znormalizowanych metod wykorzystujących zginanie, przeznaczonych do badań wytrzymałościowych różnych materiałów, np.: tworzyw sztucznych [1], żeliw [2], szkła [3], wypalanych wyrobów z ceramiki szlachetnej [4], stali [5], stopów [6], płyt pilśniowych [7] oraz ceramiki ogniotrwałej [8–9] i innych materiałów [10–11]. Ważnymi parametrami układu pomiarowego w tych metodach są: obciążenie, szybkość obciążania, rodzaj stempla obciążającego, geometria próbki i stosowany zakres maksymalnego ugięcia. Grubość próbki i rodzaj materiału próbki wpływają na wymagania sprzętowe, m.in. na rodzaj materiału, z którego jest wykonane oprzyrządowanie, aby zapewnić niższą podatność układu na odkształcenie niż podatność badanej próbki. Realizacja

* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach.

** Mgr inż., Netzsch GmbH.

badania wytrzymałości na zginanie w wysokiej temperaturze wymaga zapewnienia możliwości ogrzewania próbki bezpośrednio na stanowisku, z kontrolowaniem temperatury próbki w czasie badania.

W odniesieniu do pomiaru odkształcenia próbki przy zginaniu w wysokiej temperaturze, istotny jest sposób rejestracji tego odkształcenia. Obecnie stosowanych jest wiele różnych przyrządów do badania zachowania się materiałów ogniotrwałych podczas zginania, ale tylko niektóre z tych przyrządów pozwalają na ciągłą rejestrację przebiegu pomiaru w wysokiej temperaturze. Pomiar odkształcenia próbki z zastosowaniem trójpunktowego zginania w wysokiej temperaturze związany jest zazwyczaj z badaniem przebiegu kruchego pęknięcia, wyznaczeniem pracy pęknięcia lub modułu Younga. Do badań mających na celu wyznaczenie pracy pęknięcia stosuje się próbki z naciętym karbem o określonym kształcie, szerokości i głębokości, przy czym wpływ wymiarów karbu na przebieg pęknięcia próbki może stanowić osobny temat badań. Optymalizacja parametrów pomiarowych, takich jak podatność maszyny, wysokość próbki, głębokość karbu ułatwia uzyskanie stabilnego wzrostu pęknięcia [12].

Interesującym przedmiotem badań w tym zakresie są materiały, w których wpływ temperatury na przebieg pęknięcia jest związany m.in. z obecnością w nich defektów, naprężeń (pęknięć) lub ze zróżnicowaniem własności zestawu surowcowego. Ma to miejsce m.in. w przypadku betonów ogniotrwałych, w których występują duże nieciągłości struktury, albo ze względu na reakcje chemiczne i przemiany fazowe zachodzące podczas wstępnej obróbki cieplnej betonów [13–14]. Rejestracja odkształcenia próbki, na którą oddziałuje siła powodująca ugięcie, przedstawiona jako zależność siła – odkształcenie jest również podstawą badania betonów natryskowych, co podano w normach przedmiotowych [15–16].

Celem artykułu jest przedstawienie sposobu wyznaczenia podatności maszyny wytrzymałościowej z układem trójpunktowego zginania, zastosowanej do wyznaczenia pracy pęknięcia próbek betonów ogniotrwałych w funkcji temperatury.

2. Zastosowanie trójpunktowego zginania

Układ pomiarowy do trójpunktowego zginania najczęściej jest identyfikowany z jednym z układów przedstawionych na rycinie 1. Są to elementy oprzyrządowania wykonane ze stali, które można wykorzystać w temperaturze niższej niż 500°C. Natomiast w urządzeniach do badania przebiegu zginania w wysokiej temperaturze stanowisko, na którym montowana jest próbka, oraz element obciążający są wykonane z ceramiki wysokoogniotrwałej, najczęściej z SiC, którego własności (zwłaszcza sztywność i wymiary) nie zmieniają się w istotny sposób ze wzrostem temperatury.

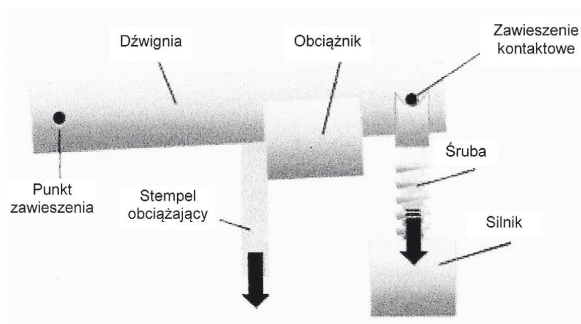


Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 1. Przykłady oprzyrządowania do trójpunktowego zginania

Na przykładzie pomiarów trójpunktowego zginania w urządzeniu HMOR 422 firmy NETZSCH GmbH zaproponowano doświadczalne wyznaczenie podatności maszyny wytrzymałościowej w funkcji temperatury. Na rycinie 2 przedstawiono schemat układu pomiarowego złożonego ze stanowiska mocowania próbki oraz układu obciążającego w tym urządzeniu. Obciążenie przenoszone jest z ramienia dźwigni na próbkę za pośrednictwem stempla obciążającego. Konstrukcja tego urządzenia umożliwia dwa sposoby obciążania próbki znajdującej się na stanowisku pomiarowym, którym odpowiadają różne warunki oddziaływania obciążenia na próbkę.

Pierwszy sposób, przeznaczony do badań wytrzymałości na zginanie, polega na przemieszczaniu się obciążnika wzdłuż ramienia dźwigni w zakresie siły do: 500 N, 1250 N, 2500 N lub 5000 N, tak aby zapewnić stałą szybkość obciążania próbki równą: 2 N/s, 4,2 N/s, 8 N/s lub 12,5 N/s.

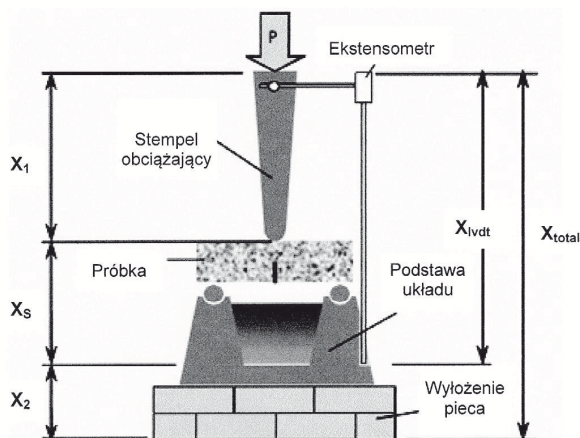


Ryc. 2. Schemat układu obciążającego w urządzeniu HMOR 422 firmy NETZSCH GmbH [12]

Drugi sposób obciążania ma na celu opuszczanie stempla obciążającego na próbkę ze stałą szybkością równą: 10 $\mu\text{m}/\text{min}$, 20 $\mu\text{m}/\text{min}$, 50 $\mu\text{m}/\text{min}$, 100 $\mu\text{m}/\text{min}$, 200 $\mu\text{m}/\text{min}$, 500 $\mu\text{m}/\text{min}$, 1000 $\mu\text{m}/\text{min}$ lub 2000 $\mu\text{m}/\text{min}$. W zależności od rodzaju materiału próbki poddawanej obciążaniu opuszczanie stempla obciążającego jest realizowane przy użyciu siły w zakresie do: 500 N, 1250 N, 2500 N lub 5000 N, za pomocą silnika krokowego (serwomotor) zawieszono na dźwigni i połączonego z układem sterującym urządzenia. Dla próbki o wysokiej podatności można przyjąć, że szybkość przemieszczania się stempla obciążającego w dół jest równa szybkości odkształcania się próbki. Im mniejsza jest podatność próbki, to znaczy: im większy opór ma do pokonania stempel obciążający, tym większa jest rozbieżność między zadaną a rzeczywistą szybkością przemieszczania się obciążnika. Dlatego na zadaną szybkość przemieszczania się stempla wpływa sztywność próbki, która może zmieniać się ze wzrostem temperatury.

Trójpunktowe zginanie z zadaną szybkością przemieszczania się stempla jest stosowane m.in. do badania przebiegu kruchego pęknięcia oraz do wyznaczania modułu sprężystości. Im wolniejsze jest przemieszczanie się obciążnika, tym dokładniej można określić wartość krytyczną naprężenia, po przekroczeniu której odkształcenie próbki przestaje być proporcjonalne do przyrostu naprężeń. Wykonanie pomiarów odkształcania próbki w wysokiej temperaturze jest możliwe dzięki zastosowaniu ekstensometru zamontowanego z jednej strony do stempla obciążającego, a z drugiej strony opartego na podstawie stanowiska, na którym spoczywa próbka, jak przedstawiono to na rycinie 3. W zobrazowanym układzie całkowite odkształcenie powiązane jest ze zmianami długości poszczególnych części, jak w układzie szeregowym i jest wypadkową wzajemnego oddziaływania wszystkich trzech części układu podczas trójpunktowego zginania. Według autorów pracy [12] wysoka sztywność SiC, z którego wykonany jest długi stempel obciążający i podstawa układu (wraz z wałeczkami zapewniającymi liniowy kontakt próbki z podstawą) powoduje, że mierzona za pomocą eks-

tensometru zmiana długości: $X_{lvd\tau} = (X_1 + X_s)$, w większej części jest związana z odkształcaniem się próbki podczas uginania.



Ryc. 3. Schemat stanowiska pomiarowego w urządzeniu HMOR 422:

$X_{lvd\tau}$ – długość układu pomiarowego równa sumie długości obciążnika (X_1), próbki i podstawy (X_s); X_{total} – długość całkowita układu równa sumie wysokości układu pomiarowego ($X_{lvd\tau}$) i wysokości podstawy pieca (X_2) [12]

Znajomość całkowitego odkształcenia układu: $X_{total} = X_1 + X_s + X_2$, jest niezbędna do sterowania szybkością opuszczania stempla obciążającego poprzez serwowomotor. Szybkość zmiany długości każdej z części układu jest proporcjonalna do podatności materiału, z którego wykonana jest ta część i do działającego naprężenia. Podczas obciążania sprężystego wartości podatności tych części pozostają niezmiennie. Podatność próbki zmienia się tylko w czasie propagacji pęknięcia. Zatem do wyznaczenia odkształcenia próbki podczas jej obciążania niezbędna jest znajomość odkształcenia własnego maszyny. Pomiar odkształcenia własnego maszyny w kolejnej temperaturze pozwala wyznaczyć podatność maszyny w funkcji temperatury.

Zaproponowane doświadczalne wyznaczenie podatności maszyny polegało na pomiarze odkształcenia układu przedstawionego na rycinie 3, w którym w miejscu badanej próbki zamontowano prostopadłościan wykonany z materiału ogniotrwałego o własnościach zbliżonych do własności materiału stempla i podstawy, stanowiący „przedłużenie” podstawy i który by był na tyle wysoki, aby w zakresie stosowanego obciążenia i temperatury nie uległ odkształceniu podczas badania. Wysokość prostopadłościanu zapewniała rejestrowanie odkształcenia układu $X_{lvd\tau}$ oraz X_{total} , w którym podatność części X_1 jest taka sama jak podatność części X_s . W układzie: stempel – prostopadłościan – podstawa wykonano serię pomiarów ze stałą szybkością obciążenia, podczas których rejestrowano siłę i odkształcenie układu.

2.1. Wyznaczenie podatności maszyny HMOR 422 firmy NETZSCH

Założeniem proponowanej metody było:

- „połączenie” stempla i podstawy układu za pomocą elementu (prostopadłościanu) wykonanego z tego samego materiału co stempel i podstawa;
- dopasowanie wysokości tego elementu tak, aby mierzone odkształcenie pochodziło od całości układu, a nie od elementu.

Opis metody:

- Pomiar odkształcenia układu polegał na cyklicznym obciążaniu zamontowanego prostopadłościanu, z najwyższą szybkością wzrostu obciążenia równą 12,5 N/s (stosowaną w badaniu wytrzymałości na zginanie wyrobów zwartych metodą opisaną w [8–9]), w temperaturze 20°C, 300°C, 600°C, 900°C i 1200°C.
- Do zarejestrowanej zależności siła – odkształcenie zastosowano regresję liniową i wyznaczono współczynnik kierunkowy – odwrotność współczynnika kierunkowego nazywana jest podatnością maszyny.

W celu wytypowania materiału do przygotowania prostopadłościanu oznaczono własności materiału pochodzącego z pozostałości stempli dotychczas stosowanych. Na próbkach pochodzących z górnej części stempla (w części zamocowania w uchwycie maszyny) i niebędącej w kontakcie z badanymi próbkami, oznaczono gęstość pozorną i porowatość otwartą, moduł Younga oraz jakościowy skład fazowy. Oznaczone własności podane w tabeli 1 potwierdziły różny stopień zużycia stempli.

Pozyskany wyrób SiC, o składzie fazowym zbliżonym do składu fazowego stempli, oznaczono symbolem „C” i dla tego wyrobu oznaczono porowatość otwartą, gęstość pozorną i moduł Younga – wyniki podano w tabeli 1.

Tabela 1

Własności materiałów, z których wykonano stemple stosowane w maszynie HMOR 422 oraz materiału „C” przeznaczonego do badania podatności maszyny wytrzymałościowej

Własność	Oznaczenie				
	stemple 1, 2	stempel 3	stempel 4	stempel 5	wyrób „C”
Gęstość pozorną [g/cm ³]	2,48 ÷ 2,53	2,65	2,49 ÷ 2,50	2,60	2,76
Porowatość otwarta [%]	20,5 ÷ 16,3	15,8	17,9 ÷ 19,1	15,8	11,1
Moduł Younga [GPa] (metoda rezonansowa)	90,6 ± 2,5 96,7 ± 2,5	154,3 ± 4,2 160,6 ± 4,2	90,9 ± 3,3 95,3 ± 3,5	130,3 ± 4,6 144,5 ± 5,1	133,0 ± 2,4 139,8 ± 2,6 131,0 ± 2,0
Skład fazowy	SiC-6H	SiC-6H	SiC-6H	SiC-6H	SiC-6H: 80,3%
	SiC-4H	–	SiC-4H	SiC-4H	SiC-4H: 11,6%
	SiC-15R	SiC-15R	SiC-15R	SiC-15R	SiC-15R: 3,3%
	Si ₃ N ₂ O	Si ₃ N ₂ O	Si ₃ N ₂ O	Si ₃ N ₂ O	Si ₃ N ₂ O: 0,8%

cd. tab. 1

Własność	Oznaczenie				
	stemple 1, 2	stempel 3	stempel 4	stempel 5	wyrób „C”
Skład fazowy	krystobalit	krystobalit	krystobalit	–	krystobalit
	trydymit	trydymit	–	–	–
	–	$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$	$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$	$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$	–
	–	$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$	–	–	–

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Dopasowanie wysokości prostopadłościanu (wyciętego z wyrobu „C”) o długości 150 mm i szerokości 25 mm, zgodnie z założeniami proponowanej metody, było powiązane z zakresem obciążenia na dźwigni maszyny (ryc. 2) w taki sposób, że ze wzrostem wysokości prostopadłościanu malało maksymalne obciążenie dostępne podczas przesuwania się obciążnika wzdłuż dźwigni. Przyjęto zatem wysokość prostopadłościanu zbliżoną do wysokości podstawy układu (ryc. 3) i równą 46 mm, co spowodowało, że możliwe było zastosowanie obciążenia nie większego niż 1250 N.

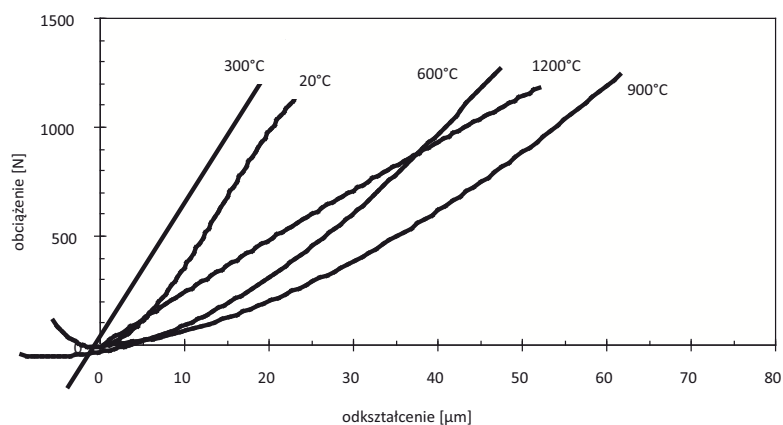
Zastosowanie tego samego prostopadłościanu w kolejnych pomiarach nie wpłynęło na powstanie w nim defektów, o czym świadczy wartość modułu Younga (135 GPa) oznaczona na tym prostopadłościanie po zakończeniu pomiarów i równa średniej z wartości początkowych modułu Younga podanych w tabeli 1.

Proces pomiarowy był modyfikowany m.in. przez przyjęcie stałego ustawienia początkowego położenia ekstensometru – niezależnie od temperatury pomiaru i przyklejenie podstawy do wyłożenia. Obserwowane zróżnicowanie wartości odkształcenia podczas kolejnego obciążania prostopadłościanu w zadanej temperaturze przypisano układowi pomiarowemu, w którym zastosowane są: wyroby ogniotrwałe o różnym kształcie i wymiarach (stempel obciążający, podstawa, próbka prostopadłościenna), oddziaływujące wzajemnie oraz ekstensometr – zamontowany nie bezpośrednio do próbki.

Ponieważ podczas pierwszego pomiaru w każdej zadanej temperaturze obserwowano nieznaczne zakłócenia sygnału odkształcenia, to w obliczeniach podatności maszyny uwzględniono wyniki drugiego pomiaru.

Wyniki otrzymane po modyfikacji procesu pomiarowego przedstawiono na rycinie 4, odpowiednio dla każdej temperatury badania.

Równanie linii prostej, kwadrat współczynnika korelacji liniowej R^2 oraz odwrotność współczynnika kierunkowego prostej otrzymane z regresji liniowej podano w tabeli 2. Natomiast na rycinie 5 przedstawiono zależność wyznaczonej podatności maszyny od temperatury.



Źródło: Opracowanie własne.

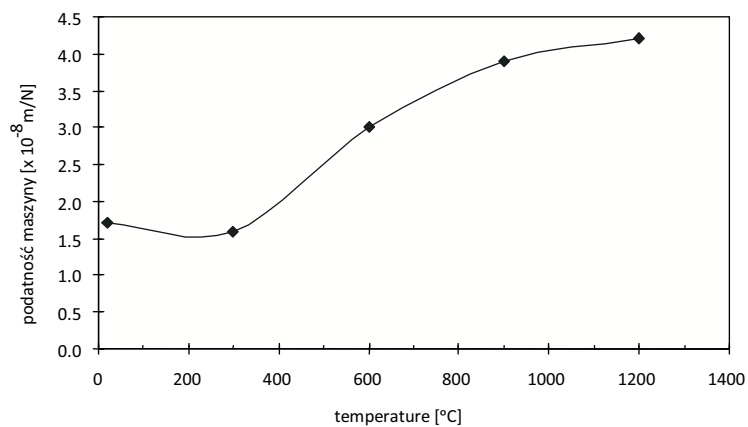
Ryc. 4. Wykres zależności rejestrowanych wielkości: siły i odkształcenia dla próbki „C” w funkcji temperatury

Tabela 2

Wyznaczona wartość podatności maszyny HMOR 422

Temperatura [°C]	Równanie linii prostej wyznaczonej w oparciu o dane przedstawione na rycinie 4	Podatność maszyny [$\times 10^{-6}$ m/N]
20	$y = 57,603x - 196,69$, $R^2 = 0,9954$	0,0174
300	$y = 61,322x + 37,136$, $R^2 = 0,9986$	0,0163
600	$y = 32,813x - 342,22$, $R^2 = 0,9906$	0,0305
900	$y = 25,853x - 391,12$, $R^2 = 0,9877$	0,0387
1200	$y = 23,565x + 5,0281$, $R^2 = 0,9989$	0,0424

Źródło: Jak w tab. 1.



Źródło: Jak w ryc. 4.

Ryc. 5. Graficzne przedstawienie zmiany podatności maszyny HMOR 422 ze wzrostem temperatury

Z przedstawionej powyżej zależności wynika, że do temperatury 400°C nie zaobserwowano wzrostu podatności maszyny. Od 900°C podatność maszyny nieznacznie wzrosła. Znając podatność maszyny w zadanej temperaturze, można obliczyć odkształcenie własne maszyny dla każdej zadanej wartości obciążenia, podczas trójpunktowego zginania próbki badanego wyrobu. Odkształcenie badanej próbki jest równe różnicy mierzonej wartości X_{ldt} i odkształcenia własnego maszyny.

2.2. Badania przebiegu zginania betonów ogniotrwałych w wysokiej temperaturze

Trójpunktowe zginanie zastosowano do badania pracy pęknięcia betonów w zakresie wysokiej temperatury. Do badań wybrano betony, dla których praca pęknięcia mogłaby być dodatkowym kryterium doboru tych materiałów do warunków pracy. Własności próbek betonów: mulitowego, andaluzytowego i boksytowego oznaczonych odpowiednio: BKM, BKA i BBN 150Cr podano w tabeli 3. Gęstość pozorną, porowatość otwartą i zawartość głównych składników oznaczono na próbkach wysuszonych w temperaturze 110°C. W oparciu o pełny skład chemiczny z wykorzystaniem programu FactSage wyznaczono temperaturę pojawienia się fazy ciekłej w badanych próbkach.

Ponieważ o własnościach materiałów ogniotrwałych w wysokiej temperaturze decyduje w dużej mierze skład osnowy wyrobu, obliczenia wykonano również dla składu materiału odpowiadającego składowi osnowy przygotowanych próbek betonów o składzie wyjściowym przyjętym dla frakcji poniżej 0,1 mm składnika głównego.

T a b e l a 3

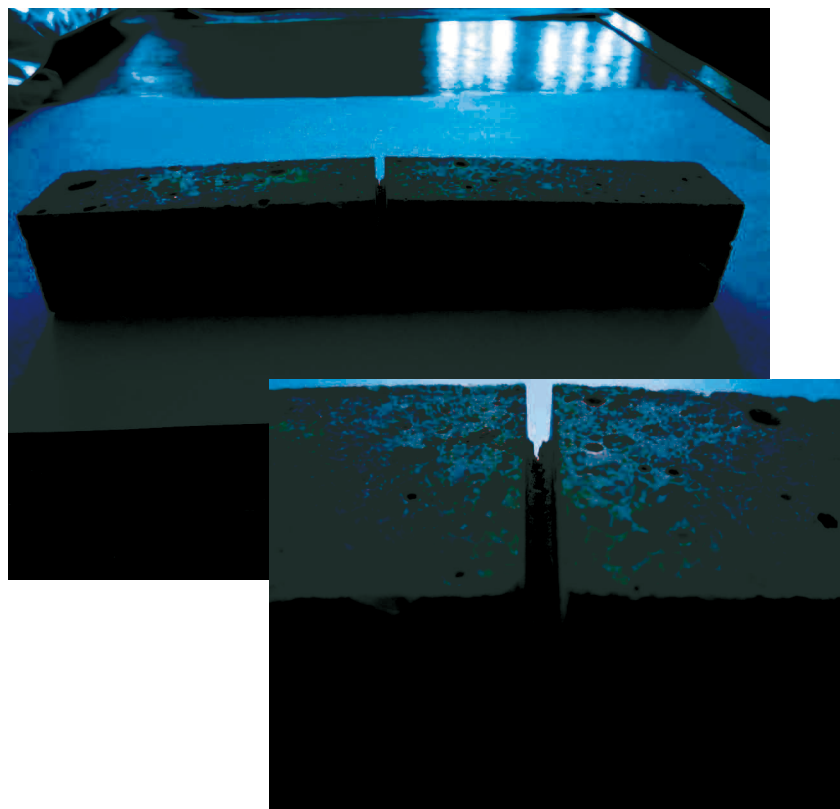
Wyniki obliczeń temperatury pojawienia się fazy ciekłej w próbkach betonów oraz w próbkach o składzie wyjściowym odpowiadającym frakcji poniżej 0,1 mm składnika głównego

Wyszczególnienie	Oznaczenie próbki		
	BKM	BKA	BBN 150Cr
Zawartość Al_2O_3 w betonie [%]	68,98	56,02	77,46
Zawartość SiO_2 w betonie [%]	24,08	36,42	8,28
Gęstość pozorną [g/cm^3]	2,686	2,754	2,819
Porowatość otwarta [%]	9,5	9,3	15,0
Temperatura pojawienia się fazy ciekłej w betonie [°C]	1166	1082	1363
Zawartość Al_2O_3 we frakcji poniżej 0,1 mm [%]	55,03	50,49	71,32
Zawartość SiO_2 we frakcji poniżej 0,1 mm [%]	27,94	34,56	12,80
Temperatura pojawienia się fazy ciekłej w osnowie [°C]	932	932	1224

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

Mając na uwadze fakt przybliżonego oszacowania temperatury pojawienia się fazy ciekłej w osnowie, określono zakres temperatury badań na $300 \div 900^{\circ}\text{C}$ oraz $300 \div 1200^{\circ}\text{C}$ dla betonu BBN 150Cr. Szybkość przemieszczania stempla obciążającego wynosiła $20 \mu\text{m}/\text{min}$.

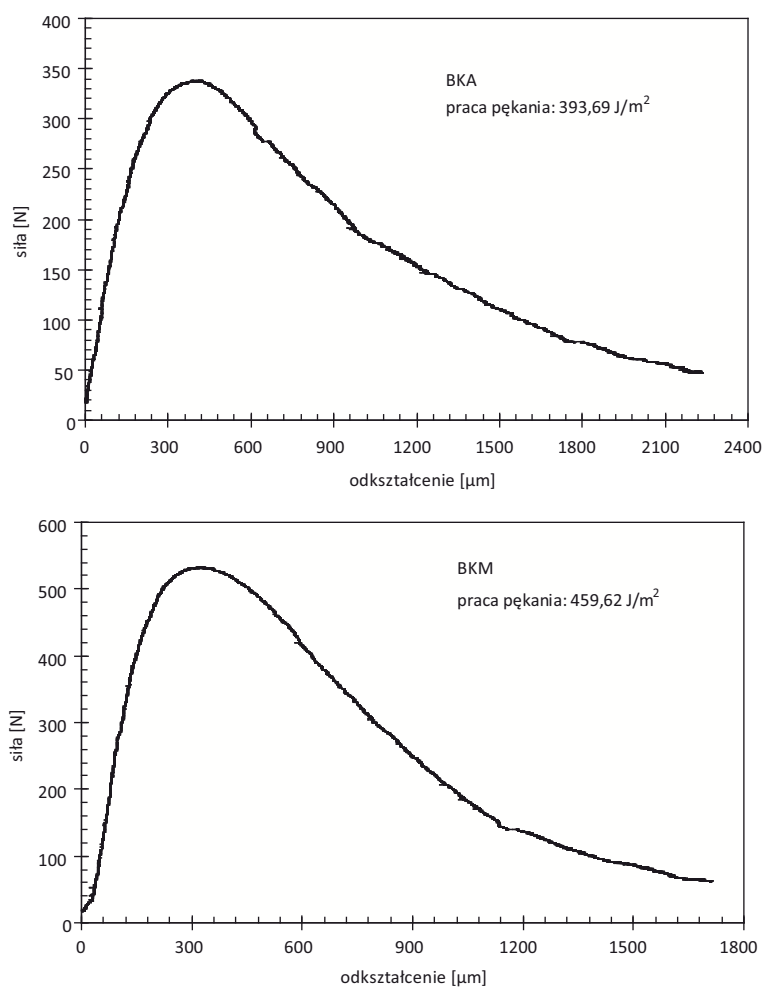
Próbki do badań wycięto zgodnie z wymaganiami normy [8–9] (tak, jak do badania wytrzymałości na zginanie), przy czym na dolnej powierzchni w stosunku do kierunku obciążania nacięto karb o głębokości ok. 8 mm. Podczas badania przebiegu pęknięcia próbka ugina się pod wpływem nacisku z góry przez stempel przemieszczający się ze „stałą” szybkością i w tym czasie następuje „rozwieranie się” nacięcia wykonanego w postaci karbu. Po przekroczeniu maksymalnej siły następuje propagacja pęknięcia na głębokość próbki, tak jak to przedstawiono na rycinie 6 dla próbki BKA badanej w temperaturze 900°C .



Źródło: Jak w ryc. 4.

Ryc. 6. Obraz próbki betonu BKA wstępnie wygrzanej w temperaturze 900°C , po badaniu w temperaturze 900°C z widocznym propagującym pęknięciem

Na rycinie 7 przedstawiono przebieg pęknięcia próbek betonów wstępnie wygrzanych w temperaturze 900°C badanych w tej samej temperaturze.



Źródło: Jak w ryc. 4.

Ryc. 7. Przebieg pęknięcia próbek betonów podczas badania w temperaturze 900°C

Do obliczenia pracy pęknięcia badanych próbek betonów, wyrażoną jako wartość pola pod krzywą siła – odkształcenie, przyjęto początkową wartość siły ok. 20 N i odpowiadającą jej początkową wartość odkształcenia próbki.

W tabeli 4 podano obliczone wartości pracy pęknięcia dla badanych próbek betonów, w temperaturze pomiaru równej temperaturze wygrzewania wstępnego. Badania przebiegu pęknięcia wykonano na trzech belkach z danego gatunku betonu, w kolejnej temperaturze. W dwóch przypadkach zastosowano dwie belki zamiast trzech.

T a b e l a 4

Wyniki obliczeń pracy pęknięcia [γ_{WOF}]

Temperatura [°C]	Oznaczenie próbki					
	BKM		BKA		BBN 150Cr	
	siła F_{max} [N]	γ_{WOF} [J/m ²]	siła F_{max} [N]	γ_{WOF} [J/m ²]	siła F_{max} [N]	γ_{WOF} [J/m ²]
300	642	78,72	780	93,26	490	119,81
	580	52,20	868	87,99	419	73,78
	618	89,40	–	–	400	57,02
600	446	75,87	567	105,18	575	120,61
	725	78,79	749	149,76	485	71,60
	612	90,60	270	121,36	624	139,08
900	450	463,49	335	395,00	774	256
	724	433,38	617	637,00	779	323
	532	459,62	337	393,69	–	–
1200	nie badano	nie badano	nie badano	nie badano	273	102,30
					149	92,93
					185	95,54

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

Fakt dużej niejednorodności próbek znalazł odzwierciedlenie w zróżnicowaniu wartości maksymalnej siły zarejestrowanej podczas pomiaru oraz w przebiegu pomiaru przedstawionego przez zależność siła – odkształcenie. Z tego względu nie obliczano wartości średniej z uzyskanych wyników. Temperatura pojawienia się fazy ciekłej w wyrobie BKM i BKA dla założonego składu osnowy, obliczona w programie FactSage, wyniosła 932°C, a w wyrobie BBN 150Cr – 1224°C. Zatem wzrost wartości pracy pęknięcia należy wiązać ze zmianami w osnowie wyrobu, zachodzącymi w temperaturze niższej niż obliczona.

Zaobserwowany znaczny wzrost wartości pracy pęknięcia betonów w temperaturze 900°C, w porównaniu z wartościami w temperaturze 300°C i 600°C, może być efektem zmian liniowych prowadzących ze wzrostem temperatury do zamykania się mikropęknięć w wyrobie, przy czym wyjaśnienie tego zjawiska wymaga wykonania badań mikroskopowych.

Natomiast spadek wartości pracy pęknięcia w temperaturze 1200°C dla próbki wyrobu BBN 150Cr może być związany z mięknięciem osnowy, jednak w tym celu należałoby wykonać badania termomechaniczne.

3. Wnioski

1. Zastosowanie trójpunktowego zginania do badań odkształcania się materiału stanowi ważne narzędzie w ocenie przebiegu pęknięcia materiałów, jednak warunkiem wyznaczenia zależności siła – odkształcenie jest znajomość odkształcenia własnego maszyny do trójpunktowego zginania.

2. Zaproponowany sposób wyznaczenia podatności maszyny, wykorzystanej następnie do obliczeń odkształcenia własnego maszyny wykazał istnienie pewnych ograniczeń technicznych maszyny HMOR 422, m.in.: ograniczenie zakresu obciążania zależne od wysokości zastosowanego elementu pośredniego między stemplem i postawą oraz ustawienie początkowe ekstensometru. Jednak niewątpliwą zaletą przedstawionego rozwiązania jest możliwość wyznaczenia odkształcenia własnego maszyny w wysokiej temperaturze.

3. Wartości maksymalne zastosowanego obciążenia podczas zginania próbek betonów wskazują, że zakres obciążenia wykorzystany do badania podatności maszyny był wystarczający dla badania przebiegu pęknięcia wybranych betonów.

4. Wyniki obliczeń pracy pęknięcia wskazują wyraźnie na zmianę własności badanych próbek w temperaturze 900°C, znacznie większą dla próbek wyrobu BKM i BKA niż dla wyrobu BBN 150Cr. Fakt wystąpienia zmian w temperaturze niższej niż spodziewana temperatura pojawienia się fazy ciekłej w wyrobie należy wiązać ze zmianami w osnowie wyrobu.

5. Znakomitą ilustracją wpływu temperatury na wielkość pracy pęknięcia są wyniki uzyskane dla materiału BBN 150Cr (tab. 4): najwyższą wartość pracy pęknięcia γ_{WOF} zarejestrowano w temperaturze 900°C, a w temperaturze 1200°C otrzymano wyniki 2–3 razy niższe.

Literatura

- [1] ASTM D797-82(1989) – Test Method for Rubber Property-Young's Modulus at Normal and Subnormal Temperatures (Withdrawn 1994).
- [2] ASTM A438-80(1997) – Standard Test Method for Transverse Testing of Gray Cast Iron (Withdrawn 2003).
- [3] ASTM D86-10a – Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure.
- [4] ASTM C674-88(2006) – Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials.
- [5] ASTM A360 Withdrawn 1993 – Method of Testing Chilled and White Iron Castings.
- [6] ASTM E190-92(2008) – Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds.
- [7] ASTM D1037-99 – Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials.
- [8] PN-EN 993-6: 1998 – Materiały ogniotrwałe – Metody badań zwartych i izolacyjnych formowanych wyrobów ogniotrwałych. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie w temperaturze otoczenia.
- [9] PN-EN 993-7: 2001 – Materiały ogniotrwałe – Metody badań zwartych i izolacyjnych formowanych wyrobów ogniotrwałych. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie w podwyższonych temperaturach.
- [10] ASTM D790-10 – Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

- [11] PN-EN ISO 178: 2006 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości przy zginaniu.
- [12] Peret C.M., Rodrigues J.A., *Stability of crack propagation during Bendig tests on brittle materiale*, „Ceramica” 2008, Vol. 54, s. 331.
- [13] Tonnesen T., Telle R., *Influence of additives and raw materials on microstructure and related high temperature properties of high alumina LCC based on white fused alumina*, [w:] *51st International Colloquium on Refractories*, Eurogress, Aachen 2008, s. 64–67.
- [14] Prokopski G., *Fracture toughness of concretes at high temperature*, „Journal of Materials Science” 1995, Vol. 30, No. 6, s. 1609–1612.
- [15] PN-EN 14488-3: 2008 – Badanie betonu natryskowego – Część 3: Wytrzymałość na zginanie (przy pierwszym piku, maksymalna i reszkowa) próbek beleczkowych zbrojonych włóknami.
- [16] PN-EN 14488-5: 2008 – Badanie betonu natryskowego – Część 5: Oznaczanie zdolności pochłaniania energii przez próbki płyt zbrojonych włóknami.

RENATA SUWAK
MAREK RAWLUK

APPLICATION OF THREE-POINT BENDING TO STUDY THE COURSE
OF DEFORMATION OF REFRACTORY CONCRETE AT HIGH
TEMPERATURE

Discusses the use of three-point bending strength in research. Shows how to determine the stiffness testing machine in the study of deformation of samples at high temperature. Are examples of refractory concrete cracking process at elevated temperature. For example, the refractory concrete showed the impact of changes in the matrix of concrete to the work of fracture as a function of temperature.