

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 27**  
(październik–grudzień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

**Rok IX**

**Warszawa–Opole 2016**

---

MAREK GAWLICKI\*  
RENATA RYPA\*\*

## Wykorzystanie popiołów lotnych jako składników hydraulicznych spoiw drogowych

**Słowa kluczowe:** hydrauliczne spoiwa drogowe, popiół lotny, odpady energetyczne, spoiwa popiołowo-cementowe, UPS.

W artykule przedstawiono wyniki badań podstawowych właściwości użytkowych spoiw popiołowo-cementowych, które mogą być wykorzystane w drogownictwie oraz dokonano ich klasyfikacji w oparciu o kryteria normy PN-EN 13282-2:2015-06. Do przygotowania spoiw obok cementu portlandzkiego wykorzystano popioły lotne z konwencjonalnego kotła pyłowego, popioły lotne z cyrkulacyjnego kotła fluidalnego oraz mieszaniny tych popiołów o stosunku masowym 1:1. Stwierdzono, że wprowadzenie do mieszanki spoiwowej już 8% cementu pozwala na uzyskanie spoiwa popiołowo-cementowego o wytrzymałości odpowiadającej klasie spoiwa N1 według PN-EN 13282-2:2015-06. Wzrost zawartości cementu portlandzkiego w spoiwach zwiększa ich wytrzymałość. Mieszanki spoiwowe zawierające 25–30%, 35–40% i 50% cementu portlandzkiego klasyfikowane są odpowiednio jako spoiwa klasy N2, N3 i N4.

### 1. Wprowadzenie

Zastąpienie surowców naturalnych odpadami przemysłowymi ma szczególnie ważne znaczenie w tych dziedzinach gospodarki, w których zużywane są duże ilości materiałów, między innymi w drogownictwie [1]. Wykorzystanie odpadów energetycznych (ubocznych produktów spalania – UPS) jako składników spoiw drogowych jest bardzo dobrym rozwiązaniem pod warunkiem, że zamiana surowców naturalnych na odpady nie obniży jakości produktu finalnego, nie będzie stwarzała zagrożeń dla środowiska naturalnego oraz będzie opłacalna

---

\* Dr hab. inż., prof. ICiMB, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, m.gawlicki@icimb.pl

\*\* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, r.rypa@icimb.pl

ekonomicznie [2]. Ważnym argumentem przemawiającym za wykorzystaniem odpadów przemysłowych w drogownictwie mogą być także korzyści techniczne, wynikające z pożądanych zmian parametrów eksploatacyjnych tworzonych z ich udziałem dzieł inżynierskich oraz możliwości kształtowania określonych właściwości użytkowych spoiw hydraulicznych zawierających UPS, w tym dynamiki narastania wytrzymałości. Spośród odpadów energetycznych w budownictwie drogowym w największych ilościach wykorzystywano dotychczas popioły lotne z konwencjonalnych kotłów pyłowych, w których spalany jest węgiel kamienny. Wprowadzenie paliw pochodzących ze źródeł odnawialnych (biopaliwa), a także wzrost liczby cyrkulacyjnych kotłów fluidalnych eksploatowanych w elektrowniach i elektrociepłowniach spowodowało powstanie znacznych ilości odpadów energetycznych o odmiennych właściwościach niż dotychczas używane UPS [3–4]. Ich racjonalne wykorzystanie stanowi swoistego rodzaju wyzwanie dla szeroko rozumianego budownictwa, w tym również dla budownictwa drogowego [5–6].

Celem pracy jest dokonanie oceny możliwości uzyskania hydraulicznych spoiw popiołowo-cementowych (mieszanek spoiwowych) o zróżnicowanej wytrzymałości, do wytwarzania których, obok popiołów lotnych z palenisk pyłowych, użyto również popiołów lotnych z cyrkulacyjnych kotłów fluidalnych. Omawiane spoiwa powinny zostać wykorzystane głównie do ulepszenia rodzimych gruntów lub do stabilizacji gruntów nawiezionych, pełniących funkcje dolnych warstw podbudowy drogowej. Ze względu na duże ilości zużywanych spoiw drogowych, jednym z czynników decydującym o ich zastosowaniu jest niska cena. Spełnienie tego warunku wymaga jak najmniejszego zużycia cementu w mieszankach spoiwowych. Mieszanki te muszą zachować jednak właściwości hydrauliczne i w sposób właściwy spełniać rolę czynnika stabilizującego podbudowę drogi wykonywaną z ich udziałem.

## 2. Materiały użyte do badań

Surowcami wyjściowymi użytymi do przygotowania mieszanek spoiwowych były popioły lotne z konwencjonalnego kotła pyłowego, w którym spalano węgiel kamienny (kod odpadu: 10 01 02) – oznaczone jako K, popioły lotne z cyrkulacyjnego kotła fluidalnego zasilanego węglem kamiennym i mułem węglowy (10 01 82) – oznaczone jako F oraz cement portlandzki powszechnego użytku – oznaczony jako C. Obydwa rodzaje popiołów były suchymi, jednorodnymi proszkami. Próbkę popiołów do badań pobierane były przy stabilnej pracy kotłów, co pozwala sądzić, że ich skład chemiczny jest zbliżony do „średniego” składu popiołów wytwarzanych w danej instalacji.

Analizy chemiczne popiołów przeprowadzone zostały zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 450-1:2012 [7], która zaleca, aby badania chemiczne wykonane

były w sposób opisany w normie PN-EN 196-2:2013-11 [8]. Wyniki analiz zestawiono w tabeli 1, podano w niej również zawartość niezwiązanego (wolnego) tlenku wapnia oznaczonego metodą acetylooctanową zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 451-1:2004 [9].

Tabela 1

*Wyniki analiz chemicznych popiołów lotnych użytych w badaniach*

Oznaczany składnik	Zawartość poszczególnych składników [% mas.]	
	popiół z kotła pyłowego	popiół z kotła fluidalnego
Strata prażenia	1,62	5,72
SiO <sub>2</sub> + cz. n.	51,28	38,34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,95	19,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,95	7,86
TiO <sub>2</sub>	1,21	0,88
CaO	3,80	12,30
MgO	2,33	2,62
Na <sub>2</sub> O	2,12	2,06
K <sub>2</sub> O	2,51	1,75
Cl <sup>-</sup>	0,23	0,21
SO <sub>3</sub>	1,00	7,51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,74	0,23
CaO <sub>w</sub>	–	3,49

Uwagi: Ponieważ wszystkie badane próbki zawierają zredukowane formy żelaza i siarki, a chlor jest związany z pierwiastkami metalicznymi, suma oznaczonych składników, podanych w formach przedstawionych w tabeli, przekracza 100%. Zawartość CaO podana w tabeli określa całkowitą zawartość CaO w badanym materiale, łącznie z wolnym tlenkiem wapnia (CaO<sub>w</sub>).

Źródło: Tab. 1-5 – opracowanie własne.

Badania stężeń naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w popiołach lotnych wykonane metodą półprzewodnikowej spektrometrii promieniowania gamma wykazały, że obydwa rodzaje popiołów spełniają wymagania zawarte w odnośnych rozporządzeniach Rady Ministrów z dnia 3.12.2002 r. Wskaźniki  $f_1$  i  $f_2$  popiołu z konwencjonalnego kotła pyłowego wynosiły odpowiednio:  $f_1 = 0,59 \pm 0,02$ ;  $f_2 = 78 \pm 3$  Bq/kg, zaś popiołu lotnego z kotła fluidalnego:  $f_1 = 0,65 \pm 0,03$ ;  $f_2 = 66 \pm 3$  Bq/kg. Miałkość popiołów lotnych (pozostałości na sicie # 45  $\mu\text{m}$ ) oznaczona zgodnie z PN-EN 451-2:1998 [10] wynosiła odpowiednio: K = 29,1%, F = 34,4%, zaś gęstość nasypowa badanych materiałów w stanie suchym była następująca: K – 865 kg/m<sup>3</sup>, F – 634 kg/m<sup>3</sup>. Wskaźniki aktywności pucolanowej obydwa rodzajów popiołów były wysokie i po 28 i 90 dniach wynosiły odpowiednio: K – 96,2% i 101,4%; F – 97,2% i 102,3%.

Do przygotowania mieszanek spoiwowych użyty został cement portlandzki CEM I 42,5 R, którego podstawowe cechy użytkowe podano w tabeli 2.

Tabela 2  
*Cechy użytkowe cementu wykorzystanego w badaniach*

Oznaczana cecha cementu	Wynik badania
Początek czasu wiązania [min]	120
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	
– po 2 dniach	26,2
– po 28 dniach	50,3
Wodozadržność [%]	28,0
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [cm <sup>2</sup> /g]	3450
Stałość objętości [mm]	0,4

Z omówionych wyżej surowców przygotowano szereg dwu- i trójskładnikowych mieszanek popiołowo-cementowych, które po homogenizacji umieszczono w szczelnie zamkniętych pojemnikach. Ponieważ wcześniejsze prace [6] wykazały, że najwyższą

wytrzymałość uzyskują mieszanki popiołowe zawierające takie same ilości konwencjonalnych popiołów lotnych z kotłów pyłowych, jak i popiołów z kotłów fluidalnych, badaniom poddano mieszanki popiołowe, w których stosunek zawartości popiołów z kotła pyłowego do zawartości popiołów z kotła fluidalnego wynosił 1:1.

Zawartości poszczególnych składników w mieszankach popiołowo-cementowych stanowiących przedmiot badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3  
*Skład popiołowo-cementowych spoiw drogowych stanowiących przedmiot badań*

Oznaczenie spoiwa	Udział składników w spoiwie [% mas.]		
	cement	popiół z kotła pyłowego	popiół z kotła fluidalnego
C100	100	–	–
C6K47F47	6	47,0	47,0
C8K46F46	8	46,0	46,0
C10K45F45	10	45,0	45,0
C10K90	10	90,0	–
C10F90	10	–	90,0
C15K42F42	15	42,5	42,5
C20K40F40	20	40,0	40,0
C20K80	20	80,0	–
C20F80	20	–	80,0
C25K37F37	25	37,5	37,5
C30K35F35	30	35,0	35,0
C30K70	30	70,0	–
C30F70	30	–	70,0
C35K32F32	35	32,5	32,5
C40K30F30	40	30,0	30,0
C50K25F25	50	25,0	25,0

Uwagi: Oznaczenia spoiw podane w tabeli należy odczytywać w następujący sposób: litery oznaczają odpowiednio: C – cement portlandzki CEM I 42,5R, K – popiół lotny z kotła pyłowego, F – popiół lotny z kotła fluidalnego. Cyfry umieszczone z prawej strony liter określają procentowy udział danego składnika w mieszance spoiwowej.

### 3. Wyniki badań

Z mieszanek spoiwowych o składach podanych w tabeli 3 przygotowano zaczyny, w których oznaczono początek czasu wiązania i stałość objętości spoiw oraz określono ilość wody zarobowej niezbędnej do uzyskania takiej samej konsystencji zapraw, jak konsystencja normowej zaprawy cementowej o wskaźniku  $w/c = 0,5$ . Konsystencję tę ustalano na stoliku rozplywu zgodnie z normą PN-EN 1015-3:2000 [11]. Wyniki oznaczeń zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4

Wyniki badań zaczynów spoiwowych o pożądanej konsystencji

Oznaczenie spoiwa	Właściwości zaczynów i zapraw popiołowo-cementowych			
	zaczyny		zaprawy	
	początek czasu wiązania [min]	stałość objętości [mm]	średnica rozplywu [cm]	stosunek wodno-spoiwowy [w/s]
C100	140	0	17,0	0,50
C6K47F47	690	2	16,5	0,74
C8K46F46	630	2	17,0	0,74
C10K45F45	580	2	16,5	0,72
C10K90	520	1	16,5	0,61
C10F90	700	2	16,5	0,90
C15K42F42	510	2	17,0	0,70
C20K40F40	500	2	17,5	0,69
C20K80	470	1	17,0	0,56
C20F80	540	2	17,0	0,81
C25K37F37	480	2	16,5	0,65
C30K35F35	410	2	16,5	0,64
C30K70	390	1	17,0	0,53
C30F70	470	1	17,5	0,75
C35K32F32	330	1	17,0	0,63
C40K30F30	300	0	16,5	0,61
C50K25F25	290	0	17,0	0,57

Badania przeprowadzone na zaczynach oraz na zaprawach wykazały, że popiół lotny z kotła fluidalnego powoduje znacznie większy wzrost wodożądności spoiw niż popiół lotny z kotłów konwencjonalnych [6]. Obydwa rodzaje popiołów wydłużają początek czasu wiązania spoiw, co wynika głównie z „rozcieńczenia” cementu zawartego w badanych spoiwach oraz powolnego uwidaczniania się skutków aktywności pucolanowej popiołów lotnych. Jest oczywiste, że znaczącą rolę w kształtowaniu właściwości użytkowych badanych zaczynów i zapraw odgrywa również duża zawartość w nich siarczanu(VI) wapnia (anhydrytu) oraz obecność niezwiązanego tlenu wapnia [6].

Wytrzymałość stwardniałych zapraw spoiwowych na ściskanie oznaczona została w oparciu o zalecenia normy PN-EN 196-1:2016-07 [12]. Zgodnie z wymaganiami tej normy do badań przygotowano belecзки zapraw o wymiarach  $160 \times 40 \times 40$  mm. Z uwagi na bardzo niską wytrzymałość wczesną części próbek, rozformowywano je dopiero po 48 godzinach, po czym przetrzymywano próbki w warunkach wodnych opisanych w normie PN-EN 196-1:2016-07 [12]. Wytrzymałość na ściskanie zapraw oznaczono po 7, 28, 56 oraz 90 dniach sezonowania. Badania przeprowadzono na trzech beleczkach, które były łamane na dwie części. Za wynik badania przyjęto średnią z 6 pomiarów ( $3 \times 2$  połówki pierwotnych beleczek). Klasę wytrzymałości hydraulicznych spoiw drogowych określono w oparciu o kryteria normy PN-EN 13282-2:2015-06 [13] (wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach sezonowania próbek zapraw w warunkach wodnych). Wyniki badań wytrzymałości na ściskania zapraw wykonanych z omawianych spoiw zamieszczono w tabeli 5.

Tabela 5

*Wytrzymałość na ściskanie zapraw przygotowanych z badanych mieszanek spoiwowych*

Oznaczenie spoiwa	Wytrzymałość zapraw na ściskanie [MPa]				Klasa spoiwa drogowego PN-EN 13282-2:2015-06
	po 7 dniach	po 28 dniach	po 56 dniach	po 90 dniach	
C100	40,6	50,5	52,8	53,3	-
C6K47F47	1,2	3,2	3,8	4,1	poza klasyfikację
C8K46F46	1,5	4,6	5,1	5,4	N1
C10K45F45	1,7	6,1	6,6	6,8	N1
C10K90	1,3	3,5	4,0	4,3	poza klasyfikację
C10F90	2,0	5,7	6,3	6,5	N1
C15K42F42	3,3	6,4	7,7	8,1	N1
C20K40F40	4,7	9,0	9,9	10,2	N1
C20K80	3,2	5,8	7,8	8,5	N1
C20F80	5,9	9,1	10,7	11,4	N1
C25K37F37	6,1	11,4	13,0	13,9	N2
C30K35F35	7,2	15,2	19,1	20,5	N2
C30K70	6,9	12,3	17,2	20,1	N2
C30F70	7,2	16,3	18,8	19,7	N2
C35K32F32	7,5	20,7	24,7	27,0	N3
C40K30F30	7,6	25,3	31,0	34,1	N3
C50K25F25	13,3	30,7	36,6	39,9	N4

## 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że jest możliwe uzyskanie popiołowo-cementowych spoiw drogowych o niewielkiej, wynoszącej ok. 8%, zawartości cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Do wytwarzania tego rodzaju spoiw mogą być wykorzystane zarówno konwencjonalne popioły lotne z palenisk pyłowych, jak i popioły lotne uzyskiwane w cyrkulacyjnych kotłach fluidalnych.

Popioły lotne z kotłów fluidalnych, jak potwierdziły to wyniki zaprezentowanych badań, są materiałami o dużej aktywności hydraulicznej, która wynika z obecności w nich aktywnych produktów dehydratacji i dehydroksylacji minerałów ilastych tworzących skałę płoną towarzyszącą złożom węgla oraz niezwiązanego tlenku wapnia (tab. 1) zawartego w popiołach. Znaczącą rolę w kształtowaniu właściwości użytkowych spoiw popiołowo-cementowych zawierających popioły z kotłów fluidalnych, podobnie jak w spoiwach popiołowo-klinkierowych [6], odgrywa zapewne również obecny w nich siarczan wapnia, który w omawianych układach tworzy uwodniony siarczano-glinian wapnia (ettringit)  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ .

Badania wykazały, że zmieniając udział cementu w mieszankach popiołowo-cementowej, można w szerokich granicach kształtować zarówno dynamikę narastania ich wytrzymałości, jak i wytrzymałość końcową. Wzrost zawartości cementu portlandzkiego w analizowanych spoiwach prowadzi do zwiększenia wytrzymałości. Mieszanki spoiwowe zawierające 8–20% cementu osiągają po 56 dniach twardnienia wytrzymałość na ściskanie zawartą w przedziale 5,1–10,7 MPa, co odpowiada klasie spoiwa N1 według PN-EN 13282-2:2015-06. Wyjątek stanowi spoiwo o składzie 10% cementu portlandzkiego i 90% popiołu lotnego z kotła pyłowego, którego wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach twardnienia wynosi tylko 4,0 MPa. Analogiczne spoiwo zawierające popiół lotny z kotła fluidalnego osiąga wytrzymałość na ściskanie 6,3 MPa. Mieszanki spoiwowe zawierające 25–30% cementu klasyfikowane są jako spoiwa N2 i osiągają wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach twardnienia 13,0–19,1 MPa, mieszanki spoiwowe o zawartości 35–40% cementu to spoiwa klasy N3. Wzrost zawartości cementu w mieszance popiołowo-cementowej do 50% jej masy umożliwia uzyskanie spoiwa klasy N4 według PN-EN 13282-2:2015-06 (tab. 5).

Podejmując próbę oceny możliwości wykorzystania popiołów lotnych jako składników popiołowo-cementowych spoiw drogowych skoncentrowano się głównie na oznaczeniu ich cech wytrzymałościowych. Uzyskanie przez spoiwa określonej wytrzymałości jest warunkiem koniecznym ich zastosowania w drogownictwie, nie jest jednak warunkiem wystarczającym. Badania potencjalnych zagrożeń konstrukcji drogowych budowanych z udziałem spoiw popiołowo-cementowych nie było przedmiotem niniejszego artykułu, należy jednak o nich wspomnieć. Możliwość tworzenia się w omawianych układach nadmiernych ilości ettringitu, zwłaszcza w późnych okresach hydratacji spoiw, była sygnalizowana w pracy [6], gdzie zagrożenie to starano się ograniczyć przez zastąpienie cementu w spoiwach drogowych zmielonym klinkierem portlandzkim. Jako potencjalne zagrożenia należy traktować również prawdopodobieństwo „przesztywnienia” konstrukcji w wyniku długotrwałego narastania wytrzymałości produktów hydratacji spoiw popiołowo-cementowych oraz tworzenie się znacznych ilości soli Friedela  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . O ile wymywalność metali ciężkich



z omawianych spoiw nie przekracza dopuszczalnych wymagań [5], problemem może być nadmierne stężenie w odciekach wodnych jonów  $[\text{SO}_4]^{2-}$ , a w określonych przypadkach również jonów chlorkowych.

## Literatura

- [1] K r a s z e w s k i C., W i l c z e k J., Mieszanki związane hydraulicznie (HBM) w nawierzchniach drogowych oraz w ulepszonym podłożu – wprowadzenie do WT-5, [w:] XXIII Seminarium Techniczne PSWNA, Jachranka k. Warszawy, 27–29 października 2010, maszynopis w posiadaniu autorów.
- [2] G a w l i c k i M., M a ł o l e p s z y J., *Wykorzystanie odpadów przemysłowych w produkcji materiałów budowlanych*, [w:] *Problemy naukowo-badawcze budownictwa*, t. 4: *Zrównoważony rozwój w budownictwie*, red. A. Łapko, M. Broniewicz, J.A. Prusiel, Politechnika Białostocka, Białystok 2008, s. 389–410.
- [3] R a j c z y k K., *Popioły lotne z kotłów fluidalnych i możliwości ich uszlachetniania*, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Opole 2012.
- [4] R a j c z y k K., G i e r g i c z n y E., S z o t a M., *Ocena możliwości wykorzystania w drogownictwie popiołów nowej generacji powstających ze spalania biomasy*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2013, nr 12, s. 72–87.
- [5] G a w l i c k i M., G r a u r Z., Ś l ę z a k E., *Popioły lotne ze spalania biomasy jako składnik spoiw drogowych*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2014, nr 19, s. 34–46.
- [6] G a w l i c k i M., W o n s W., *Popioły lotne z kotłów fluidalnych jako składnik popiołowo-cementowych spoiw drogowych*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2011, nr 8, s. 69–78.
- [7] PN-EN 450-1:2012 – Popiół lotny do betonu. Cz. 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- [8] PN-EN 196-2:2013-11 – Metody badania cementu. Cz. 2: Analiza chemiczna cementu.
- [9] PN-EN 451-1:2004 – Metoda badania popiołu lotnego. Cz. 1: Oznaczanie zawartości wolnego tlenku wapnia.
- [10] PN-EN 451-2:1998 – Metoda badania popiołu lotnego. Oznaczanie mialkości przez przesiewanie na mokro.
- [11] PN-EN 1015-3:2000 – Metody badań zapraw do murów. Określenie konsystencji świeżej zaprawy.
- [12] PN-EN 196-1:2016-07 – Metody badania cementu. Cz. 1: Oznaczanie wytrzymałości.
- [13] PN-EN 13282-2:2015-06 – Hydrauliczne spoiwa drogowe. Cz. 2: Hydrauliczne spoiwa drogowe normalnie wiążące. Skład, wymagania i kryteria zgodności.

*MARREK GAWLICKI*  
*RENATA RYPA*

## UTILIZATION OF FLY ASHES AS HYDRAULIC ROAD BINDERS COMPONENTS

**Keywords:** hydraulic road binders, fly ash, coal combustion by-products, Portland cement-fly ash binders.

The paper presents results of studies on functional properties of Portland cement-fly ash binders, that can be used for road engineering. The binders were also classified in accordance with PN-EN 13282-2:2015-06 standard. Portland cement, as well as fly ashes from a conventional pulverized fuel fired boiler, fly ashes from a circulation fluidized bed boiler and 1:1 ratio by mass mixtures of both types of ashes, were used to prepare the binders. It was found that addition of only 8% of Portland cement allows to obtain Portland cement-fly ash binder with a compressive strength of a strength class for N1 binder according to PN-EN 13282-2:2015-06 standard. An increase of Portland cement content in binders improves their strength. Binding mixtures containing 25–30%, 35–40% and 50% of Portland cement are classified accordingly as binders of classes N2, N3 and N4.