

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Wpływ dodatku z rozdrobnionych opon samochodowych na właściwości mechaniczne betonów stosowanych w budownictwie rolniczym

EWA OŁDAKOWSKA

**POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA,
ZAKŁAD INŻYNIERII DROGOWEJ**

Słowa kluczowe: beton, rozdrobnione odpady gumowe, właściwości mechaniczne

STRESZCZENIE

Rozdrobnione zużyte opony samochodowe ze względu na posiadane właściwości mogą być z powodzeniem stosowane w budownictwie, także do produkcji betonów cementowych. Rozdrobniona guma może stanowić częściowy substytut kruszywa naturalnego, którego ubywa wraz z kurczeniem się zasobów naturalnych Ziemi. Przybywa natomiast rokrocznie ogromna ilość zużytych opon samochodowych, których zgodnie z unijnymi dyrektywami nie można składować w całości od 1 lipca 2003 roku, a od 1 lipca 2006 również w stanie rozdrobnionym.

Przeprowadzone badania dowiodły, że obecność materiału gumowego wpływa na właściwości mechaniczne modyfikowanych betonów stosowanych w budownictwie rolniczym.

The influence of grinded vehicle tyres on the mechanical properties of concretes used in the agricultural building engineering

Keywords: concrete, disintegrated rubber waste material, mechanical properties

ABSTRACT

The grinded used vehicle tyres, due to their properties, may be successfully used in the building engineering, also for production of cement concretes. The grinded rubber may be the partial substitute of the natural aggregate, which becomes less available when the natural Earth resources become used. On the other hand, the huge amount of used vehicle tyres increases each year, which according to the European directives must not be stored as a whole since the 1st of July 2003, and also in the grinded state since the 1st of July 2006.

The realized tests have proven that the presence of the rubber material has the influence on the mechanical properties of modified concretes, used the agricultural building engineering.

1. WPROWADZENIE

Beton będący w formie podstawowej mieszanką cementu, kruszywa i wody obecnie jest kompozytem coraz bardziej złożonym, często nawet pięcio- i sześciokładnikowym (domieszki, dodatki). W zależności od cech kruszywa, spoiwa oraz sposobu wykonywania można uzyskiwać betony o bardzo zróżnicowanych właściwościach. Przykładem takiego betonu, w którym obecność dodatku wpływa na zmianę jego właściwości, jest beton z rozdrobnionymi odpadami gumowymi. Beton ten może stanowić alternatywę dla tradycyjnych betonów wykorzystywanych w stodołach, garażach, magazynach narzędzi, maszyn i sprzętu rolniczego, wiatkach czy zadaszeniach [1].

Badania pokazują, że odpady gumowe ze zużytych opon samochodowych mogą stanowić cenny materiał [2-5], którego ogromne ilości, ze względu na utrudniony recykling (opony oprócz gumy zawierają elementy tekstylne i stalowe) oraz brak zorganizowanego systemu zbiórki i składowania, wyrzucane są na wysypiska legalne i dzikie bądź spalane.

Nie tylko wzrost świadomości ekologicznej wymusza konieczność poszukiwania różnych możliwości ponownego wykorzystania zużytych opon, lecz także uwarunkowania prawne. Parlament Europejski już w 1999 roku rozpatrzył dwie dyrektywy o istotnym znaczeniu dla rozwiązania problemu zużytych opon:

- Dyrektywę 1999/31/EC (Landfill Directive), która wprowadziła zakaz składowania całych zużytych opon od 1 lipca 2003 roku, a od 1 lipca 2006 również opon rozdrobnionych: zobowiązała także kraje członkowskie do stworzenia warunków umożliwiających realizację tego zamierzenia;

- Dyrektywę 2000/53/EC (End-of-Life Vehicle Directive), która określiła sposób postępowania z pojazdami po zakończeniu ich eksploatacji; zgodnie z nią opony powinny być zdjęte z pojazdu przed jego złomowaniem.

2. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

2.1 Cement

Do przygotowania mieszanek betonowych użyto cementu portlandzkiego bez dodatków CEM I 32,5 R [6, 7] w ilości 300 kg/m³.

2.2 Kruszywo

Do wykonania próbek wykorzystano piasek rzeczny oraz mieszankę żwirową o uziarnieniu do 8 mm.

2.3 Guma

Składnikiem modyfikującym były mechanicznie rozdrobnione opony samochodowe w postaci pyłu, miazgi i granulatu (wielkość cząstek: 0,0-2,0 mm) wyprodukowane w Krośnie Odrzańskim.

2.4 Receptury betonów

Zaprojektowano mieszanki betonowe o jednokowej konsystencji V1, badanej metodą Vebe [8] (czas wibrowania potrzebny do zetknięcia się całej powierzchni krążka aparatu z mieszanką w cylindrze dla tej konsystencji to 21 ÷ 30 s). Konsystencję regulowano poprzez zmniejszenie ilości wody (mieszanki z kruszywem „gumowym”). Piasek o uziarnieniu 0÷2 mm wymieniono objętościowo na pył, miazgę i granulację gumową (wymieniono 10%, 20% i 30% piasku). Receptury mieszanek przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1 Składy mieszanek betonowych na 1 m³

Table 1 Concrete mix compositions per 1 m³

| SERIA (*) | CEMENT | ROZDROBNIONE ODPADY GUMOWE | KRUSZYWO NATURALNE | WODA |
|-----------|--------|-------------------------------|-----------------------|------|
| - | [kg] | [kg] | [kg] | [kg] |
| 1 | 300 | - | 1 996 | 150 |
| 2 | 300 | 39 | 1 927 | 146 |
| 3 | 300 | 78 | 1 854 | 143 |
| 4 | 300 | 117 | 1 783 | 140 |

* 1 – mieszanka betonowa zawierająca kruszywo naturalne piaskowo-żwirowe

2, 3, 4 – mieszanki betonowe, zawierające rozdrobnione odpady gumowe w ilości odpowiednio 2%, 4% i 6% w stosunku do masy kruszywa

2.5 Dozowanie składników, formowanie próbek i zagęszczanie

Do badań stosowano próbki: beleczkowe o wymiarach 4×4×16 cm oraz walce o średnicy $d=15$ cm i wysokości $h=30$ cm. Mieszanki betonowe do wykonania próbek beleczkowych sporządzano w mieszarce laboratoryjnej, w której prędkość obrotowa mieszadła wynosiła 140/285 obr/min. Jednorazowy zarób wystarczał do wypełnienia jednej trójdzielnej formy. Przez 1,5 min mieszano suche składniki: cement, kruszywo i rozdrobnione odpady gumowe. Następnie dodawano wodę i mieszano przez około 3 min. Mieszanekę układano w formach w dwóch warstwach i zagęszczano. Zagęszczanie przeprowadzano w dwójaki sposób: na stoliku wibracyjnym o częstotliwości drgań 50 ± 5 Hz i średniej amplitudzie 0,5 mm oraz na wstrząsarce. Mieszanki do wykonywania walców przygotowywano w laboratoryjnej betoniarce przeciwbieżnej. Mieszanki zagęszczano na stoliku wibracyjnym w dwóch warstwach. Całkowity czas wibrowania nie przekraczał 2 min.

Wykonane z mieszanek próbki, po normowym okresie dojrzewania, poddano badaniom: wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i modułu sprężystości betonu. Badanie wytrzymałości na ściskanie (porównawcze) przeprowadzono na półwkach próbek beleczkowych 4×4×16 cm. Do badań wykorzystano legalizowaną prasę hydrauliczną trójzakresową o regulowanej szybkości narastania naprężenia. Próbki umieszczano w specjalnej wkładce zapewniającej nacisk o powierzchni 16 cm². Zakres pomiarowy siłomierza prasy wytrzymałościowej dobrano tak, aby największa siła potrzebna do zniszczenia próbki nie przekraczała 70% pełnego zakresu obciążeń. Szybkość przyrostu naprężenia wynosiła 0,2 MPa/s. Wytrzymałość określano jako średnią z sześciu pomiarów wyznaczanych przy wykorzystaniu wzoru:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

w którym:

F – obciążenie niszczące, [N],

A_c – pole przekroju poprzecznego próbki, [mm²].

Oznaczenie wykonano po 28, 90 i 180 dniach dojrzewania próbek.

Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (porównawcze) wykonano na beleczkach 4×4×16 cm. Badanie przeprowadzono w warunkach

centrycznego obciążenia punktowego przy wykorzystaniu systemu badawczego firmy MTS z zamontowanymi przetwornikami do pomiaru sił oraz przemieszczeń, sprzężonego z komputerem umożliwiającym jednoczesne i synchroniczne sterowanie kilkoma kanałami wymuszeń. Maszynę wytrzymałościową wzbogacono o specjalne wyposażenie umożliwiające właściwe badanie próbki w kształcie belecзки. Oznaczenia wykonano po 28, 90 i 180 dniach dojrzewania próbek, w komorze klimatyzacyjnej (temperatura pokojowa, wilgotność $\geq 95\%$). Wytrzymałość określono jako średnią z czterech pomiarów.

Badaniu siecznego modułu sprężystości poddano próbki walcowe o średnicy $d=15$ cm i wysokości $h=30$ cm, po 28 dniach ich dojrzewania. Na pobocznicę każdej próbki naklejano wzdłuż tworzącej walca, w połowie wysokości, co 120° , trzy tensometry elektrooporowe o bazie pomiarowej 50 mm. Każdą próbkę obciążano trzykrotnie do poziomu około 50% siły niszczącej i odciążano. Pomiaru odkształceń w trakcie cyklicznego obciążania i odciążania dokonano przy wykorzystaniu systemu pomiarowego DAQVIEW firmy IOTECH obsługiwanego przez oprogramowanie IOTECH DAQVIEW.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Średnie wyniki badania wytrzymałości na ściskanie półówek próbek beleczkowych przedstawiono w Tabeli 2.

Z analizy wyników zaprezentowanych w Tabeli 2 wynika, że zawartość rozdrobnionych zużytych opon samochodowych w betonach istotnie wpływa na ich wytrzymałość na ściskanie. Guma w ilości 2% w modyfikowanym betonie wpływa na obniżenie wytrzymałości o około 20%, dodatek w ilości 4% – to wyniki słabsze o około 25%, a 6% „frakcji gumowej” – to wytrzymałość obniżona o ponad 32%. Porównanie wyników wytrzymałości na ściskanie półówek próbek beleczkowych zagęszczanych na wstrząsarce i stoliku wibracyjnym, przeznaczonym do badań mieszanki betonowej metodą Vebe, daje różnicę niewielką, kształtującą się na poziomie od 2% przy 2% i 6% zawartości gumy do ponad 6% przy 4% zawartości rozdrobnionych opon.

W celu ustalenia ogólnej postaci funkcji aproksymującej opisującej wytrzymałość na ściskanie zaplanowano doświadczenie trójczynnikowe, w którym analizowanymi zmiennymi były:

Tabela 2 Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie f_c [MPa] połówek próbek beleczkowych
Table 2 The results of crushing strength f_c tests [MPa] of halves of bar samples

| f_c | ZAWARTOŚĆ ODPADÓW GUMOWYCH | | | |
|----------------------|----------------------------|------|------|------|
| | 0% | 2% | 4% | 6% |
| $f_{c,28}$ [MPa]/ A | 33,5 | 26,5 | 24,9 | 23,1 |
| $f_{c,28}$ [MPa]/ B | 34,1 | 26,3 | 23,2 | 22,9 |
| $f_{c,90}$ [MPa]/ A | 38,8 | 30,6 | 29,0 | 26,7 |
| $f_{c,90}$ [MPa]/ B | 39,5 | 30,5 | 27,5 | 26,5 |
| $f_{c,180}$ [MPa]/ A | 42,4 | 34,2 | 33,3 | 28,8 |
| $f_{c,180}$ [MPa]/ B | 42,8 | 35,2 | 31,1 | 29,3 |

A – mieszanki betonowe zagęszczane na wstrząsarce, B – mieszanki betonowe zagęszczane na stoliku wibracyjnym

- czynnik X_1 – zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych w betonie [0%, 2%, 4%]
- czynnik X_2 – sposób zagęszczania [A, B]
[A – zagęszczanie na wstrząsarce; B – zagęszczanie na stoliku wibracyjnym]
- czynnik X_3 – wiek betonu [28 dni, 90 dni, 180 dni].

Naturalne wartości czynników kodowano z sigma-ograniczeniami. Nowe zmienne przyjmowały postać ciągu liczb całkowitych o wartościach -1, 0 i 1. Jednolitość rzędu wariancji poszczególnych prób sprawdzono za pomocą kryterium Cochra. Sprawdzenie wykazało, że przy liczbie powtórzeń w próbie $n=6$ oraz liczbie porównywalnych wariancji $N=18$ obliczeniowa wartość kryterium Cochra wynosi:

$$G = \frac{5,7187}{74,390} = 0,0769 \quad (2)$$

i przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ jest mniejsza niż krytyczna wartość $G_{(0,05; 5, 18)} = 0,3587$ [9]. Stwierdzono, że wariancje prób są jednorodne, a rezultaty badania odtwarzalne.

Wartość generalnej wariancji odtwarzania eksperymentu równą:

$$S_y^2 = \frac{74,390}{18} = 4,1327 \quad (3)$$

przyjęto jako jednakową dla całego obszaru oddziaływania czynników. Rezultaty analizy wariancji zawiera Tabela 3. Sprawdzenia hipotezy o istotności wpływu czynników X_1 , X_2 i X_3 dokonano zgodnie z kryterium Snedecora. Porównanie wartości obliczeniowych i tablicowych pozwoliło ustalić, że spośród badanych czynników, czynniki

X_1 i X_3 mają istotny wpływ na wytrzymałość betonu na ściskanie oraz współdziałanie czynników X_1 i X_2 . Czynnik X_2 i wzajemne działanie czynników X_1 i X_3 , X_2 i X_3 oraz X_1 , X_2 i X_3 są statystycznie nieistotne. Z porównania wartości procentowych badanych czynników można ustalić, że dominujący wpływ na wytrzymałość na ściskanie ($\approx 56\%$) ma zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych pochodzących ze zużytych opon samochodowych, mniejszy, ale wyraźny wpływ ma także wiek betonu ($\approx 34\%$).

Matematyczny opis zmian wytrzymałości na ściskanie w zależności od czynników X_1 , X_2 , X_3 to wielomian drugiego stopnia postaci:

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (4)$$

Przy ustalaniu wartości współczynników regresji wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów, która jest w pełni przydatna do aproksymacji danych przy zastosowaniu wielomianów pierwszego i drugiego stopnia.

Istotność współczynników regresji sprawdzono za pomocą testu t-Studenta (poziom istotności = 0,05). Wartości istotnych współczynników zawiera Tabela 4.

Równanie regresji zawierające tylko istotne współczynniki przedstawia się następująco:

$$\hat{y} = 30,901 - 4,250X_1 + 4,017X_3 - 1,514X_1X_2 + 3,179X_1^2 - 0,407X_2^2 - 0,550X_3^2 \quad (5)$$

Tabela 3 Wyniki analizy wariancji wpływu czynników X_1 , X_2 i X_3 na wytrzymałość betonu na ściskanie**Table 3** The results of analysis of variance of influence of factors X_1 , X_2 and X_3 on the compression strength of the concrete

| ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI | SUMA KWADRATÓW | LICZBA STOPNI SWOBODY | WARIANCJA | F_{emp} | F_{kr} |
|--|----------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|
| Czynnik X_1 | 2 008,4 | 2 | 1 004,2 | 295,03 | 3,10 |
| Czynnik X_2 | 7,8 | 1 | 7,8 | 2,30 | 3,95 |
| Czynnik X_3 | 1 230,5 | 2 | 615,3 | 180,76 | 3,10 |
| Współdziałanie czynników X_1 i X_2 | 47,8 | 2 | 23,9 | 7,02 | 3,10 |
| Współdziałanie czynników X_1 i X_3 | 8,2 | 4 | 2,0 | 0,60 | 2,47 |
| Współdziałanie czynników X_2 i X_3 | 1,4 | 2 | 0,7 | 0,20 | 3,10 |
| Współdziałanie X_1 , X_2 i X_3 | 2,2 | 4 | 0,6 | 0,16 | 2,47 |
| Błąd modelu | 306,3 | 90 | 3,4 | - | - |
| Razem | 3 612,6 | 107 | - | - | - |

Tabela 4 Wartości istotnych współczynników regresji**Table 4** The values of significant regression coefficients

| ISTOTNE WSPÓŁCZYNNIKI REGRESJI | WARTOŚCI ISTOTNYCH WSPÓŁCZYNNIKÓW REGRESJI |
|--------------------------------|--|
| b_0 | 30,901 |
| b_1 | - 4,250 |
| b_3 | 4,017 |
| b_{11} | 3,179 |
| b_{12} | - 1,514 |
| b_{22} | - 0,407 |
| b_{33} | - 0,550 |

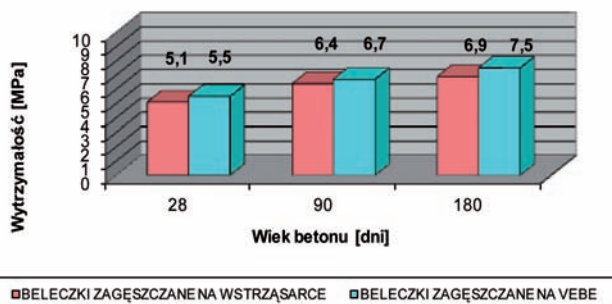
Stopień dostosowania funkcji obiektu badań do wyników pomiarów sprawdzono za pomocą kryterium Snedecora, a efekty zawarto w Tabeli 5. Na podstawie wyników zawartych w Tabeli 5 stwierdzono, że model adekwatnie opisuje dane doświadczalne, które stanowiły podstawę do jego sformułowania.

Badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (metodą porównawczą) poddano próbki betonu kontrolnego oraz próbki zawierające rozdrobnione odpady gumowe. Średnie wartości wytrzymałości kompozytów betonowo-gumowych po 28, 90 i 180 dniach dojrzewania przedstawiono na Rysunkach 1, 2 i 3.

Tabela 5 Ocena adekwatności ustalonego modelu**Table 5** The assessment of adequacy of determined model

| ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI | SUMA KWADRATÓW | LICZBA STOPNI SWOBODY | WARIANCJA | F_{emp} | F_{kr} |
|-------------------|----------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|
| Funkcja | 3 262,189 | 6 | 543,6981 | 626,1436 | 2,191 |
| Reszta | 87,701 | 101 | 0,8683 | - | - |
| Razem | 3 349,890 | - | - | - | - |

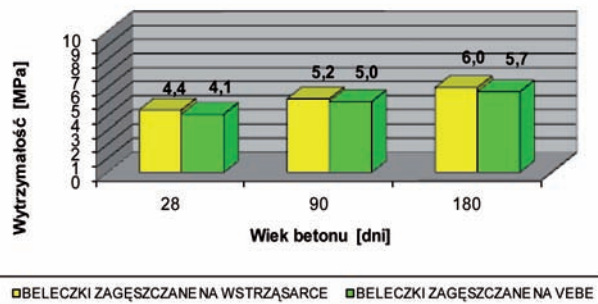
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (metoda porównawcza)
- beleczki zawierające 2% rozdrobnionej gumy



Rysunek 1 Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, badane metodą porównawczą, próbek beleczkowych z 2% zawartością rozdrobnionych odpadów gumowych

Figure 1 The average values of tensile strength while bending, tested with use of comparing method, for the bar samples consisting 2% of grinded rubber waste material

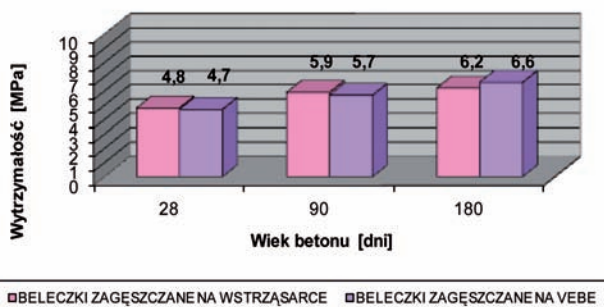
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (metoda porównawcza)
- beleczki zawierające 6% rozdrobnionej gumy



Rysunek 3 Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, badane metodą porównawczą, próbek beleczkowych z 6% zawartością rozdrobnionych odpadów gumowych

Figure 3 The average values of tensile strength while bending, tested with use of comparing method, for the bar samples consisting 6% of grinded rubber waste material

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (metoda porównawcza)
- beleczki zawierające 4% rozdrobnionej gumy



Rysunek 2 Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, badane metodą porównawczą, próbek beleczkowych z 4% zawartością rozdrobnionych odpadów gumowych

Figure 2 The average values of tensile strength while bending, tested with use of comparing method, for the bar samples consisting 4% of grinded rubber waste material

Z zestawień wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (badanych metodą porównawczą), które przedstawiono na Rysunkach 1, 2 i 3 wynika, że podobnie jak w przypadku badania wytrzymałości na ściskanie zauważalny jest spadek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Wytrzymałość betonów modyfikowanych kształtuje się na poziomie niższym o 10% (dla 2% zawartości gumy), 16% (dla 4% zawartości gumy) i 23% (dla 6% zawartości gumy) w stosunku do wytrzymałości betonu z kruszywem naturalnym. Podczas wykonywania badań stwierdzono, że próbki z dodatkami niszczyły się przy większych odkształceniach.

Do określenia istotności wpływu zawartości dodatku gumowego (czynnik X_1), sposobu zagęszczenia (czynnik X_2) oraz wieku betonu (czynnik X_3) na tle rozrzutu wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, w poszczególnych próbach, zastosowano trójczynnową analizę wariancji wyników badania. Podobnie, jak w przypadku badania wytrzymałości na ściskanie, zastosowano kodowanie z sigma-ograniczeniami, a wartości kodowane zmiennych ustalono na trzech poziomach -1 (dolny), 0 (środkowy) i 1 (górnny). Jednolitość rzędu wariancji poszczególnych prób sprawdzono za pomocą kryterium Cochra. Stwierdzono, że wariancje prób są jednorodne, a rezultaty badania odtwarzalne, ponieważ obliczeniowa wartość kryterium Cochra, przy liczbie powtórzeń w próbie $n=4$ oraz liczbie porównywalnych wariancji $N=18$ wynosi:

$$G = \frac{0,2867}{2,5967} = 0,1104 \quad (6)$$

i jest mniejsza niż wartość krytyczna $G_{(0,05; 3, 18)} = 0,5394$ [9]. Wariancję generalną odtwarzania eksperymentu równą:

$$S_y^2 = \frac{2,5967}{18} = 0,1443 \quad (7)$$

uznano za jednakową dla całego obszaru oddziaływania czynników. Rezultaty analizy wariancji zamieszczono w Tabeli 6. Porównując wartości obliczeniowe i tablicowe kryteriów Snedecora ustalono wpływ czynników X_1 , X_2 i X_3

na wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu. Stwierdzono istotny wpływ na obniżenie wytrzymałości jedynie zawartości dodatku w postaci rozdrobnionej gumy i wieku betonu (czynnik dominujący). Sposób zagęszczania, a także wspólne oddziaływanie czynników X_1 i X_2 , X_1 i X_3 , X_2 i X_3 oraz X_1 , X_2 i X_3 są statystycznie nieistotne.

Jako funkcję opisującą zmiany wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu przyjęto wielomian drugiego stopnia postaci:

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (8)$$

Tabela 6 Wyniki analizy wariancji wpływu czynników X_1 , X_2 i X_3 na wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu
Table 6 The results of analysis of variance of influence of factors X_1 , X_2 and X_3 on the tensile strength while bending of the concrete

| ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI | SUMA KWADRATÓW | LICZBA STOPNI SWOBODY | WARIANCJA | F _{emp} | F _{kr} |
|--|----------------|-----------------------|-----------|------------------|-----------------|
| Czynnik X_1 | 15,264 | 2 | 7,632 | 52,90 | 3,17 |
| Czynnik X_2 | 0,569 | 1 | 0,569 | 3,94 | 4,03 |
| Czynnik X_3 | 40,580 | 2 | 20,290 | 140,65 | 3,17 |
| Współdziałanie czynników X_1 i X_2 | 0,632 | 2 | 0,316 | 2,19 | 3,17 |
| Współdziałanie czynników X_1 i X_3 | 0,376 | 4 | 0,094 | 0,65 | 2,55 |
| Współdziałanie czynników X_2 i X_3 | 0,322 | 2 | 0,161 | 1,12 | 3,17 |
| Współdziałanie X_1 , X_2 i X_3 | 0,200 | 4 | 0,050 | 0,35 | 2,55 |
| Błąd modelu | 7,790 | 54 | 0,144 | - | - |
| Razem | 65,733 | 71 | - | - | - |

Tabela 7 Wartości istotnych współczynników regresji
Table 7 The values of significant regression coefficients

| ISTOTNE WSPÓŁCZYNNIKI REGRESJI | WARTOŚCI ISTOTNYCH WSPÓŁCZYNNIKÓW REGRESJI |
|--------------------------------|--|
| b_0 | 6,311 |
| b_1 | - 0,542 |
| b_3 | 0,917 |
| b_{22} | 0,178 |
| b_{33} | - 0,233 |

Wartości współczynników regresji zawarte w Tabeli 7 ustalono przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów, a istotność współczynników sprawdzono za pomocą testu t-Studenta przy poziomie istotności = 0,05.

Oto równanie regresji zawierające tylko istotne współczynniki:

$$\hat{y} = 6,311 - 0,542X_1 + 0,917X_3 + 0,178X_2^2 - 0,233X_3^2 \quad (9)$$

Stopień dostosowania funkcji obiektu badań do wyników pomiarów sprawdzono za pomocą kryterium Snedecora, a efekty zawarto w Tabeli 8.

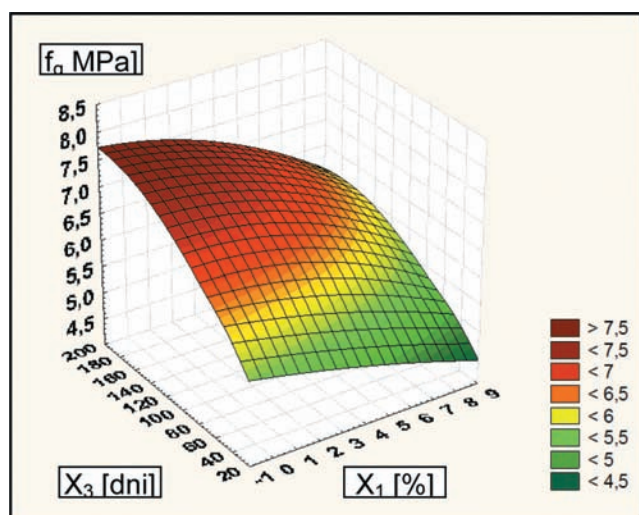
Dane zawarte w tabeli potwierdzają zgodność modelu z danymi doświadczalnymi, które były podstawą do jego sformułowania.

Rysunek 4 jest interpretacją graficzną ustalonego modelu uwzględniającą wartości rzeczywistych czynników. Wynika z niego niezbicie, że rozdrob-

Tabela 8 Ocena adekwatności ustalonego modelu
Table 8 The assessment of adequacy of determined model

| ŹRÓDŁO ZMIENNOŚCI | SUMA KWADRATÓW | LICZBA STOPNII SWOBODY | WARIANCJA | F_{emp} | F_{kr} |
|-------------------|----------------|------------------------|-----------|-----------|----------|
| <i>Funkcja</i> | 55,85667 | 4 | 13,96417 | 531,255 | 2,511 |
| <i>Reszta</i> | 1,76111 | 67 | 0,02629 | - | - |
| <i>Razem</i> | 57,61778 | - | - | - | - |

nione odpady gumowe powodują spadek wytrzymałości na rozciąganie. Czynnikiem czasowym, w postaci okresu dojrzewania, to czynnik, który tradycyjnie powoduje wzrost wytrzymałości zarówno betonu kontrolnego, jak i betonów modyfikowanych.



Rysunek 4 Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, badanej metodą porównawczą, od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych i wieku betonu

Figure 4 The relation of tensile strength while bending tested with use of comparing method, and content of disintegrated rubber waste material and concrete age

Badanie modułu sprężystości betonu, przeprowadzone po 28 dniach dojrzewania próbek, dotyczyło betonu kontrolnego zawierającego tylko kruszywo piaskowo-żwirowe oraz betonów modyfikowanych rozdrobnionymi odpadami gumowymi. Średnie wartości modułu sprężystości podłużnej zaprezentowano w Tabeli 9.

Wyniki zawarte w Tabeli 9 wskazują, że statyczny współczynnik sprężystości betonu ulega zmianie wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych pochodzących ze zużytych opon samochodowych. Moduł sprężystości podłużnej betonu z 2% mieszaniny pyłu, miazgi i granulatu gumowego jest o 6% niższy od modułu betonu porównawczego. Modyfikacja betonu 4% gumy powoduje spadek modułu o 8%, a dodatek w ilości 6% – daje wyniki słabsze o 11%.

4. WNIOSKI

Wyniki badań laboratoryjnych oraz ich analiza statystyczna pozwoliły sformułować następujące wnioski:

1. Właściwości mechaniczne betonów modyfikowanych gumą różnią się wyraźnie od wytrzymałości betonów bez udziału gumy. Charakteryzuje je

Tabela 9 Wyniki badania modułu sprężystości betonu
Table 9 The results of tests of coefficient of elasticity of the concrete

| E_{cm} | ZAWARTOŚĆ ODPADÓW GUMOWYCH | | | |
|-----------------|----------------------------|-------|-------|-------|
| | 0% | 2% | 4% | 6% |
| E_{cm1} [GPa] | 37,27 | 35,02 | 33,17 | 27,38 |
| E_{cm2} [GPa] | 35,80 | 33,43 | 28,88 | 28,86 |
| E_{cm3} [GPa] | 36,43 | 31,14 | 30,15 | 32,01 |
| E_{cm} [GPa] | 36,50 | 33,20 | 30,73 | 29,41 |

obniżona wytrzymałość na ściskanie oraz na rozciąganie przy zginaniu, a także niższa wartość modułu sprężystości podłużnej, ale znacznie poprawiona odkształcalność, obserwowana szczególnie przy zniszczeniu, którego charakter nie jest tak gwałtowny jak w betonach tradycyjnych.

2. Analiza statystyczna uzyskanych wyników badań pozwoliła opracować zależności prognozujące zmiany badanych cech w zależności od rozpatrywanych czynników, a wynikające z niej prawidłowości potwierdziły słuszność przyjętych metod badawczych i opracowanych równań regresji.

LITERATURA

- [1] Ołdakowska E., Możliwość zastosowania betonów modyfikowanych rozdrobnionymi odpadami gumowymi w budownictwie rolniczym, *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna T.*, 17, nr 2 (2012), 61-68.
- [2] Biel T. D., Lee H., Use of Recycled Tire Rubbers in Concrete, *Proceedings of the ASCE 3rd Materials Engineering Conference, Infrastructure: New Materials and Methods of Repair*, 1994.
- [3] Eldin N. N., Senouci A. B., Rubber Tire Particles as Concrete Aggregate *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 5, nr 4, pp. 478-496, 1993.
- [4] Goulias D. G., Ali A. H., Enhancement of portland cement concrete with tire rubber particles, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Philadelphia, USA, 1996.
- [5] Khatib Z. K., Bayomy F. M., Rubberized Portland Cement Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 206-213, August 1999.
- [6] PN-EN 197-1: 2002 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [7] PN-EN 197-2: 2002 Cement – Część 2: Ocena zgodności.
- [8] PN-EN 12350-3: 2001 Badania mieszanki betonowej – Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe.
- [9] Zieliński W., *Tablice statystyczne*, Warszawa, Fundacja „Rozwój SGGW”, 1999.