

# Ocena możliwości wykorzystania odpadu po śrutowaniu do zapraw cementowych

## Assessment of utilizing waste shot-blasting media in cement mortars

dr inż. Jolanta Borucka-Lipska (ORCID: 0000-0002-5647-2993), mgr inż. Hanna Pawłowska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1305

**Streszczenie:** Celem pracy była ocena możliwości zastąpienia piasku naturalnego w zaprawach cementowych odpadem po śrutowaniu. Odpad otrzymano z lokalnej firmy, która zajmowała się oczyszczaniem elementów stalowych metodą ciśnieniową z zendry hutniczej i rdzy nalotowej. Piasek zastępowano odpadem w ilości 10, 20, 30 i 50% objętości kruszywa. Przeprowadzono badania konsystencji, gęstości objętościowej, nasiąkliwości, współczynnika absorpcji wody spowodowanego podciąganiem kapilarnym oraz wytrzymałości na zginanie i ściskanie po 1, 7 i 28 dniach dojrzewania. Uzyskane wyniki badań zapraw z odpadem wykazały, że śrut po śrutowaniu może być z powodzeniem zastosowany jako częściowy zamiennik piasku do zapraw o zwiększonej gęstości w osłonach przed promieniowaniem radioaktywnym.

**Słowa kluczowe:** zaprawa cementowa, odpad po śrutowaniu, wytrzymałość.

**Abstract:** The aim of the work was to assess the possibility of replacing natural sand in cement mortars with waste shot-blasting media. The waste was obtained from a local company that used the abrasive media for shot-blasting of steel elements to remove the metallurgical scale and flash rust. Sand was replaced with waste at 10, 20, 30 and 50% of the aggregate volume. The tests included determination of consistency, bulk density, water absorption, water absorption coefficient caused by capillary action, and bending and compressive strength after 1, 7 and 28 days of curing. The results obtained from the waste mortars showed that shot blasting can be successfully applied to higher density mortars used in radiation shielding.

**Keywords:** cement mortar, waste shot-blasting media, strength.

## 1. Wprowadzenie

Budownictwo jest jedną z bardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin gospodarki. Głównym materiałem wykorzystywanym w budownictwie jest beton, będący kompozytem składającym się z cementu, kruszywa, wody, dodatków mineralnych i domieszek chemicznych. Kruszywo naturalne stanowi około 70% objętości betonu. Wysokie wykorzystanie zasobów kruszyw naturalnych i jego coraz bardziej ograniczona dostępność skutkuje poszukiwaniem alternatywnych wypełniaczy, w tym materiałów mogących zastąpić w betonie piasek naturalny. Jednym z działań wpisujących się w strategię zrównoważonego rozwoju jest dbałość o środowisko naturalne i ograniczenie rabunkowej gospodarki zasobami naturalnymi, jak i inne niż wcześniej spojrzenie i myślenie o odpadach z różnych dziedzin gospodarki. W budownictwie stosuje się wiele materiałów, do produkcji których wykorzystuje się materiały wcześniej uznawane za uciążliwe odpady. Dziś stanowią one często cenny składnik nowoczesnych betonów. Do takich materiałów możemy zaliczyć między innymi popioły lotne, pyły krzemionkowe czy żużle wielkopiecowe. W wielu ośrodkach na świecie, a także w kraju, prowadzone są

badania i próby zagospodarowania w betonach różnych odpadów, np. włókien stalowych z opon samochodowych, odpadów plastikowych, odpadów z oczyszczalni ścieków, zużytego garnetu, stłuczki szklanej, odpadowego piasku korundowego itp. [1–7]. Przemysł dostarcza też wiele innych odpadów, które czekają na zagospodarowanie. Jedną z takich gałęzi przemysłu, która generuje duże ilości odpadów jest przemysł metalurgiczny. Wśród różnych odpadów, powstałych w procesach metalurgicznych, są zużyte ścierniwa wykorzystywane do czyszczenia konstrukcji stalowych. Próby zastosowania odpadu po śrutowaniu elementów stalowych były podejmowane w kilku ośrodkach badawczych, gdzie głównie były zastosowane do produkcji zapraw i betonów tłumiących promieniowanie jonizujące [8–11]. W Polsce problematyka projektowania betonów osłonowych z ciężkimi kruszywami naturalnymi prowadzona była przede wszystkim przez zespół z IPPT PAN i Politechniki Warszawskiej [12–13]. W badaniach tych stosowano kruszywo ciężkie barytowe lub magnetytowe, nie odpady stalowe. W artykule podjęto próbę oceny możliwości wykorzystania odpadu w postaci zużytego śrutu po oczyszczaniu elementów stalowych, który otrzymano z lokalnej firmy jako zamiennika piasku w zaprawach cementowych.

Wynikami prowadzonych badań zainteresowana jest firma, z której uzyskano ścierniwo, a dla której zagospodarowanie odpadu jest istotnym problemem.

## 2. Materiały użyte do badań

Badania wykonano na zaprawach cementowych, do których wykorzystano cement portlandzki CEM I 42,5R spełniający wymagania normy PN-EN 197-1 [14] oraz droбноziarniste kruszywo frakcji 0/2 – piasek, pochodzące z kopalni kruszyw w Bielinku. W badaniach zastosowano jako częściowy zamiennik piasku odpad po śrutowaniu – śrutem stalowym łamanym. Śrut stalowy łamany jest to ścierniwo metalowe wysokiej jakości, po pełnej obróbce cieplnej, który powstaje w procesie kruszenia śrutu kulistego. Charakteryzuje się bardzo niskim pyleniem i wysoką trwałością w stosunku do piasku, żużli i ścierniw syntetycznych. Śrut stalowy łamany ma ostre krawędzie, co daje zdecydowanie większe rozwinięcie powierzchni od śrutów kulistych. W wyniku śrutowania zapewnia on bardzo dobrą przyczepność nakładanej następnie powłoki ochronnej lub pozwala efektywnie usunąć stare powłoki w przypadku prac remontowych. Występuje w trzech typach twardości i stanowi doskonałą alternatywę dla piasków kwarcowych i żużli odpadowych. Najlepsze efekty ekonomiczne i techniczne śrutu łamanego ostrokrawędziowego uzyskuje się w komorach do pneumatycznej obróbki strumieniowo-ścierniej z profesjonalnym systemem separacji ścierniwa. Śrut stalowy łamany jest szeroko stosowany w pracach antykorozyjnych do: oczyszczania spawów i miejsc okołospawowych, nadawania powierzchni powtarzalnego i założonego „ostrego” profilu chropowatości w celu ułatwienia przyczepności nakładanych następnie powłok ochronnych w postaci farb wszelkiego typu, tworzyw sztucznych, gumowych, natryskiwanych metali, ujednoczenia wyglądu powierzchni i jej satynowania, oczyszczenia odlewów stalowych i żeliwnych z tzw. przypaleń lub po ich wyżarzaniu lub hartowaniu [15].

Zastosowany do badań odpad to zużyty śrut stalowy łamany po kilkukrotnym użyciu w komorach do pneumatycznej obróbki strumieniowo-ścierniej z systemem do separacji ścierniwa stosowany do oczyszczania elementów stalowych pod ciśnieniem z zendry hutniczej i rdzy nalotowej pokrywającej stal. Pochodzi on z ze śrutu stalowego łamanego spełniającego wymagania normy PN-EN ISO 11124-3 i charakteryzującego się następującymi właściwościami [15]:

- twardość: 700 HV, 570–710 HV, 470–610 HV,
- gęstość właściwa: > 7,2 g/cm<sup>3</sup>,
- ciężar nasypowy: 4,29–4,5 kg/dm<sup>3</sup>.

Skład chemiczny śrutu deklarowany przez producenta to:

- węgiel (C): 0,8–1,2%,
- mangan (Mn): 0,35–1,2%,
- krzem (Si): min. 0,4%,
- siarka (S): max. 0,05%,
- fosfor (P): max. 0,05%.

Przed ustaleniem składu receptur oznaczono gęstości odpadu w piknometrze gazowym ULTRAPYC 1200e, uzyskując wynik pomiaru – 7,56 g/cm<sup>3</sup>.

Badania laboratoryjne prowadzono na zaprawach o zróżnicowanym składzie. Skład zaprawy referencyjnej ustalono przez modyfikację zaprawy normowej o stosunku kruszywo-cement-woda 3:1:0,5 przygotowanej zgodnie z normą PN-EN 196-1 [16] na piasku wzorcowym CEN. Składy badanych zapraw, w których zastąpiono odpowiednio 10, 20, 30 i 50% objętości piasku naturalnego odpadem w postaci ścierniwa przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Skład badanych zapraw cementowych

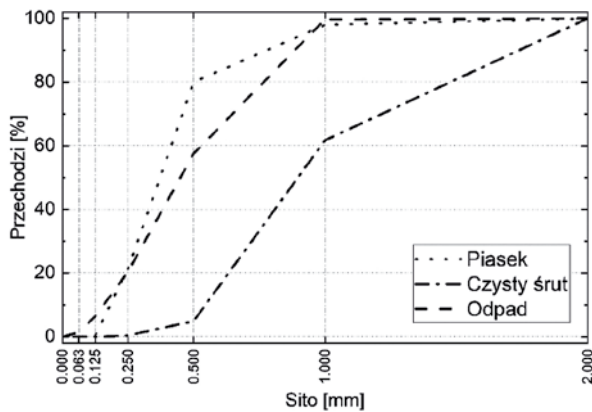
Receptura	Cement [g]	Piasek [g]	Woda [ml]	Odpad [g]
ZR (0% odpadu)	450	1272	255	-
Z1 (10% odpadu)	450	1145	255	362,9
Z2 (20% odpadu)	450	1018	255	725,8
Z3 (30% odpadu)	450	890,4	255	1088,6
Z4 (50% odpadu)	450	636	255	1814,4

## 3. Program badań

Program badań obejmował oznaczenie składu ziarnowego piasku oraz śrutu przed i po śrutowaniu zgodnie z normą PN-EN 933-1 [17]. Po wymieszaniu wszystkich składników z danej receptury określano konsystencję zaprawy za pomocą stolika rozplywu zgodnie z normą PN-EN 1015-3 [18] i oznaczono gęstość objętościową świeżej zaprawy według normy PN-EN 1015-6 [19] oraz stwardniałej zaprawy po 28 dniach dojrzewania zgodnie z normą PN-EN 1015-10 [20]. Pozostałe badania, na stwardniałej zaprawie, wykonano na beleczkach o wymiarach 40x40x160 mm. Badanie nasiąkliwości zapraw metodą moczenia przeprowadzono zgodnie z normą PN-B-04500 [21], natomiast oznaczenie współczynnika absorpcji wody spowodowane podciąganiem kapilarnym według normy PN-EN 1015-18 [22]. Wytrzymałość na zginanie i ściskanie oznaczono na podstawie normy PN-EN 1015-11 [23] po 24 godzinach, 7 i 28 dniach dojrzewania. Wszystkie próbki po rozformowaniu dojrzewały do czasu badania w powietrzu w temperaturze 20±2°C oraz wilgotności względnej otoczenia RH 95%.

## 4. Wyniki badań i analiza

Wyniki analizy sitowej piasku oraz śrutu przed i po śrutowaniu (odpadu) przedstawiono na rysunku 1. Maksymalne uziarnienie wszystkich badanych materiałów wynosiło do 2 mm. Śrut przed śrutowaniem w swoim składzie nie miał najdrobniejszych frakcji od 0 do 0,125 mm, a zawierał głównie z frakcje od 0,5 mm do 2,0 mm (około 95%). Natomiast odpad zawierał 6,3% frakcji 0–0,125, a piasek 0,3%.



Rys. 1. Krzywe ziarnowe piasku, czystego śrutu i odpadu

Śrut po śrutowaniu, po kilkukrotnej obróbce oczyszczania elementów stalowych, uległ rozdrobieniu i krzywa analizy sitowej jest zbliżona do krzywej uziarnienia piasku użytego do badań. Ścierniwo po obróbce ma o połowę mniej frakcji 0,5–2,0 mm niż śrut, ale o około dwa razy więcej niż piasek.

Wyniki badania konsystencji zapraw metodą stolika rozplwowego przedstawiono w tabeli 2. Podczas wizualnej oceny nie widać segregacji czy braku jednorodności świeżej mieszanki. Wszystkie zaprawy uzyskały konsystencję plastyczną mieszczącą się w przedziale rozplwy 140–200 mm [19].

Wyniki badania gęstości świeżej i stwardniałej zaprawy porównano w tabeli 3. Wraz ze zwiększającą się ilością odpadu w zaprawie zwiększa się jej gęstość objętościowa, co związane jest ze znacznie większą gęstością samego odpadu, która wynosi 7,56 g/cm<sup>3</sup> w porównaniu do gęstości piasku – 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 2. Badanie konsystencji świeżej zaprawy za pomocą stolika rozplwy

ZR	Z1 (10%)	Z2 (20%)	Z3 (30%)	Z4 (50%)
<b>Średnice rozplwy [mm]</b>				
165	167	172	174	174

Tabela 3. Gęstość objętościowa świeżej i stwardniałej zaprawy

Receptura	Gęstość objętościowa świeżej zaprawy [g/cm <sup>3</sup> ]	Gęstość objętościowa stwardniałej zaprawy [g/cm <sup>3</sup> ]
ZR (0%)	2,1	2,0
Z1 (10%)	2,3	2,2
Z2 (20%)	2,5	2,4
Z3 (30%)	2,8	2,5
Z4 (50%)	3,2	2,9

Wyniki badań nasiąkliwości oraz współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarny stwardniałej zaprawy po 28 dniach dojrzewania przedstawiono na rysunku 2. Wraz ze zwiększeniem ilości odpadu następuje spadek nasiąkliwości.

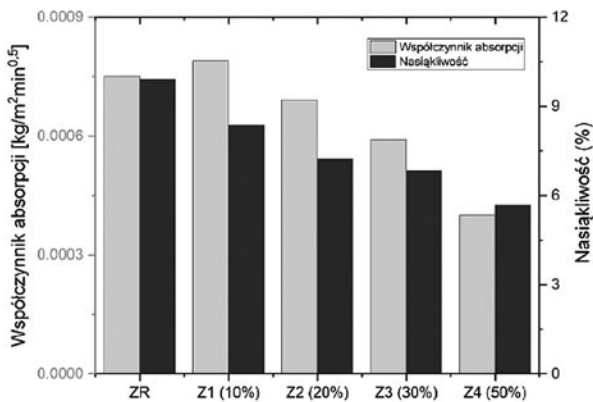
Zaprawa Z4, w której 50% objętości piasku zamieniono odpadem, miała dwukrotnie niższą nasiąkliwość niż zaprawa referencyjna. Analogiczne wyniki uzyskano w określeniu współczynnika absorpcji.

Średnie wyniki badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie po 24 godzinach, 7 i 28 dniach twardnienia zapraw przedstawia rysunek 3. Próbkę z zaprawy Z4 po 24 godzinach nie związały, nie można było ich rozformować, by określić wytrzymałość. Analizując wartości wytrzymałości, można stwierdzić, że procentowy spadek wytrzymałości na zginanie poszczególnych zapraw wynosi: Z1 – 2,74%, Z2 – 9,08%, Z3 – 15,06%, Z4 – 32,7%, a na ściskanie po 28 dniach dojrzewania: Z1 – 2,6%, Z2 – 12,5%, Z3 – 24,5%, Z4 – 47%.

Mimo spadku wytrzymałości zapraw z odpadem w stosunku do zaprawy referencyjnej uzyskane wartości wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania zarówno na zginanie (Z1-6,4 MPa, Z2-6,0 MPa, Z3-5,6 MPa, Z4-4,4 MPa), jak i na ściskanie (Z1-40,4 MPa, Z2-36,3 MPa, Z3-31,3 MPa, Z4-22,0 MPa) są satysfakcjonujące, z ograniczeniem ilości odpadu do 20–30% zamiany piasku na odpad.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy wykazały, że badany odpad po śrutowaniu powstały w procesie oczyszczania z zendry hutniczej i rdzy nalotowej elementów stalowych metodą obróbki strumieniowo-ścierniej może być użyty z powodzeniem do zapraw cementowych jako zamiennik części piasku. Stosując zamianę piasku do 30%



**Rys. 2.** Nasiąkliwość i współczynnik absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym

odpadem, uzyskano zaprawy o wytrzymałości na zginanie do 5,6 MPa i na ściskanie do 31,3 MPa i znacznie zwiększonej gęstości w stosunku do zaprawy referencyjnej. Przeprowadzone badania wstępne zaczynów ze śrutem po śrutowaniu stanowią dobry prognostyk do dalszych badań zapraw i betonów o zwiększonej gęstości mających zastosowanie w osłonach przed promieniowaniem jonizującym.

**BIBLIOGRAFIA:**

[1] Skibicki S., Jakubowska P., Kaszyńska M., Sibera S., Cendrowski K., Hoffmann M., Early-Age Mechanical Properties of 3D-Printed Mortar with Spent Garnet, *Materials*, tom 15, zeszyt 1, 2022, str. 1–16, ISSN: 1996-1944, doi: 10.3390/ma15010100

[2] Jamaludin N. F. A., Muthusamy K., Isa N. N., Md Jaafar M. F., Ghazali N., Use of Spent Garnet in Industry: A Review, *Materials Today: Proceedings* 2021, doi:10.1016/j.matpr.2021.02.210

[3] Muttashar H. L., Ariffin M. A. M., Hussein M. N., Hussin M. W., Ishaq S. B., Self-Compacting Geopolymer Concrete with Spent Garnet as Sand Replacement, *Journal of Building Engineering* 15, 2018, str. 85–94, doi:10.1016/j.jobbe.2017.10.007

[4] Huseien G. F., Sam A. R. M., Shah K. W., Budiea A. M. A., Mirza J., Utilizing Spent Garnets as Sand Replacement in Alkali-Activated Mortars Containing Fly Ash and GBFS, *Construction and Building Materials* 225, 2019, str. 132–145, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.149

[5] Skibicki S., Pułtorak M., Kaszyńska M., Hoffmann M., Ekiert E., Sibera D., The effect of using recycled PET aggregates on mechanical and durability properties of 3D printed mortar, *Construction and Building Materials*, tom 335, 2022, str. 1–16; ISSN: 0950-0618, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127443

[6] Pawelska-Mazur M., Kaszyńska M., Mechanical performance and environmental assessment of sustainable concrete reinforced with recycled end-of-life tyre fibres, *Materials* tom 14, zeszyt 2, 2021, str. 1–20, ISSN: 1996-1944

[7] Horszczaruk E., Kiernożycki W., Wpływ piasku korundowego na właściwości betonu cementowego, *Materiały Budowlane* 9/2023, doi: 10.15199/33.2023.09.03

[8] Lermen R. T., Prauchner M. B., Silva R. A., Bonsembiante FT. Using wastes from the process of blasting with steel shot to make a radiation shield in mortar, *MDPI*, 12/2020, doi:10.3390/su12166674

[9] Ahmed S. Ouda., Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding, *Progress in Nuclear Energy* 79, 2015, str. 48–55

[10] Akkurt I., Basyigit C., Kilincarslan S., Mavi B., Akkurt A., Radiation shielding of concretes containing different aggregates, *Cement and Concrete Composites* 28, 2006, str. 153–157

[11] Maslehuudin M., Naqvi A., Ibrahim M., Kalakada Z., Radiation shielding properties of concrete with electric arc furnace slag aggregates and steel shot, *Annals of Nuclear Energy* 53, 2013, str. 192–196

[12] Piotrowski T., Shielding concrete with neutron attenuating and absorbing components. In S. T. Abdulrahman, S. Tomas, Z. Ahmad (Ed.) *Micro and Nanostructured Composite Materials for Neutron Shielding Applications*, Elsevier, Woodhead Publishing, 2020, str. 177–218, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819459-1.00007-6>

[13] Załęgowski K., Piotrowski T., Garbacz A., Influence of polymer modification on the microstructure of shielding concrete, *Materials*, 13(3)498, 2020, str. 1–15, <https://doi.org/10.3390/ma13030498>

[14] PN-EN 197-1:2013: Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku

[15] <https://pph-rewa.pl/produkt/srut-stalowy-lamany/> (data dostępu 12.02.2023)

[16] PN-EN 196-1: 2016-07: Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości

[17] PN-EN 933-1:2012: Badania geometrycznych właściwości kruszywa. Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego – metoda przesiewania

[18] PN-EN 1015-3: 2000: Metody badań zapraw do murów – określenie konsystencji świeżej zaprawy za pomocą stolika rozpląwu

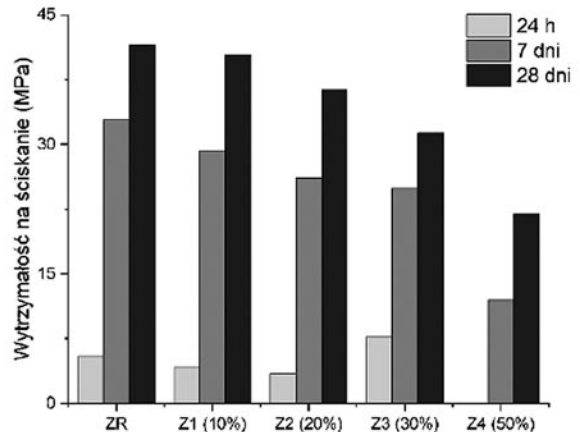
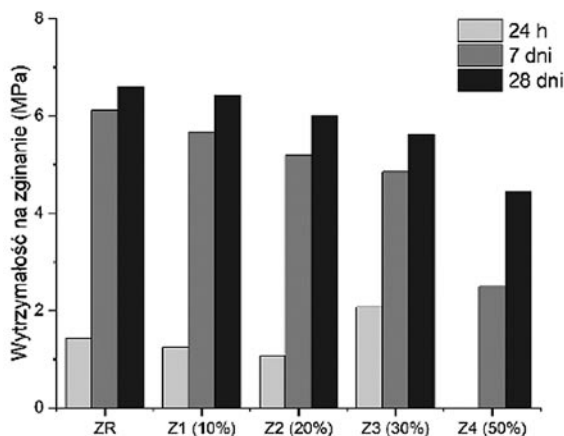
[19] PN-EN 1015-6: 2000: Metoda badań zapraw do murów. Część 6: Określenie gęstości objętościowej świeżej zaprawy

[20] PN-EN 1015-10: 2001, Metoda badań zapraw do murów. Część 10: Określenie gęstości wysuszonej stwardniałej zaprawy

[21] PN-B-04500: 1985: Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych

[22] PN-EN 1015-18: 2003: Metoda badań zapraw do murów. Część 18: Określenie współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy

[23] PN-EN 1015-11: 2020, Metoda badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy



**Rys. 3.** Wytrzymałość na zginanie i ściskanie zapraw cementowych po 24 h, 7 i 28 dniach dojrzewania