

dr inż. Kamil Słowiński¹⁾
ORCID: 0000-0002-4225-520X

Studies on the behaviour of EPS polystyrene under compression in the light of standard provisions and subject literature

Badanie zachowania styropianu EPS przy ściskaniu w świetle zapisów normy oraz literatury przedmiotu

DOI: 10.15199/33.2025.04.09

Abstract. The article discusses selected provisions of the PN-EN ISO 29469:2023-05 standard regarding the testing methodology and the method of assessing the results of the EPS polystyrene compression test, in the context of the preparation of test elements, the testing procedure and assessment of the results of the EPS polystyrene compression test and the possible possibility of structural use of this material. The provisions of the standard are discussed against the background of research results presented in the literature on the subject and the author's own research. The need to supplement the standard provisions is indicated.

Keywords: EPS polystyrene; compressive strength; modulus of elasticity.

Streszczenie. W artykule omówiono wybrane zapisy normy PN-EN ISO 29469:2023-05 dotyczące metody badań i sposobu oceny wyników próby ściskania polistyrenu EPS, w kontekście przygotowania elementów próbnych, procedury badań i oceny wyników próby ściskania polistyrenu EPS oraz ewentualnej możliwości konstrukcyjnego wykorzystania tego materiału. Zapisy normy omówiono na tle rezultatów badań przedstawionych w literaturze przedmiotu oraz badań własnych. Wskazano przy tym na konieczność uzupełnienia zapisów normowych.

Słowa kluczowe: styropian EPS; polistyren; wytrzymałość na ściskanie; moduł sprężystości.

Expanded polystyrene (EPS) is one of the most commonly used thermal insulation materials in both new and existing buildings. One of the most popular categories of construction products made from this material includes insulation boards for walls, roofs, floors, and building foundations. The vast majority of these boards are produced from expanded polystyrene (EPS). This material is created through a process in which polystyrene granules are expanded under the influence of pressurized steam. These granules significantly increase in volume, forming so-called beads, which, after further exposure to steam, are fused into polystyrene blocks from which insulation boards are cut. Since air constitutes up to 98% of the volume of EPS, the material exhibits relatively low thermal conductivity and serves as an excellent insulator. However, the widespread application of EPS is also influenced by its mechanical properties, which enable its use as a structural material. The most well-known structural applications of EPS include its use as lightweight fill in road substructures and railway embankments [2 ÷ 4] or as a core component in sandwich panels for building wall and roof enclosures [5]. In recent years, driven by the search for new construction solutions capable of meeting the stringent requirements of EU climate policies, there has been growing interest in using EPS as a material for load-bearing building

styropian należy do grupy najczęściej stosowanych materiałów termoizolacyjnych w nowych i istniejących budynkach. Jedną z najbardziej popularnych kategorii wyrobów budowlanych wykonanych z tego materiału są płyty do izolacji termicznej ścian, dachów i podłóg oraz fundamentów budynków. Zdecydowana większość tych płyt produkowana jest z polistyrenu ekspandowanego EPS. Materiał ten powstaje w procesie spieniania granulek polistyrenu pod wpływem pary wodnej pod ciśnieniem. Granulki te wielokrotnie zwiększają swoją objętość, tworząc tzw. ziarna, z których po ponownym działaniu pary wodnej powstają bloki styropianu, a z nich wycinane są płyty. Aż 98% objętości struktury tak powstałego polistyrenu EPS stanowi powietrze, dlatego też materiał ten charakteryzuje się relatywnie małą przewodnością cieplną i stanowi bardzo dobry izolator. Na powszechne zastosowanie polistyrenu EPS mają jednak wpływ również właściwości mechaniczne, które umożliwiają jego użycie jako materiału konstrukcyjnego. Do najbardziej znanego konstrukcyjnego zastosowania polistyrenu można zaliczyć jego wykorzystanie w roli lekkiego wypełnienia podbudowy dróg i nasypów kolejowych [2 ÷ 4] lub komponentu (rdzenia) płyt warstwowych obudowy ścian i dachów budynków [5]. W ostatnich latach, na fali poszukiwań nowych rozwiązań konstrukcyjnych mogących sprostać restrykcyjnym wymaganiom polityki klimatycznej UE, obserwuje się również zainteresowanie użyciem polistyrenu EPS w roli materiału stosowanego do budowy ustrojów nośnych budynków [6], najczęściej przez zapewnienie je-

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; kamil.slowinski@polsl.pl

structures [6], typically by integrating it with other structural components. In this context, it is crucial to conduct a thorough assessment of the mechanical properties of EPS. This necessity arises from the fact that standards [1] and [7 ÷ 11] primarily focus on evaluating the mechanical properties relevant to its conventional, predominantly non-structural applications.

This paper discusses selected provisions of the PN-EN ISO 29469:2023-05 [1] standard regarding the testing methods and evaluation criteria for the compressive strength of EPS, considering insights gained from literature reviews and experimental studies conducted in collaboration with one of the largest high-quality polystyrene manufacturers in the country. The standard provides guidelines for determining compressive strength and the compression modulus of elasticity under short-term compressive loads at ambient temperature (approximately 23°C). In practice, the results of compression tests serve as the primary basis for the preliminary selection of EPS grades for applications requiring load-bearing capacity. These results are frequently used by polystyrene manufacturers for quality control, and it is common practice to indicate the experimentally determined compressive strength [kPa] in the trade names of products, such as floor insulation boards [12]. The paper also presents proposals for supplementing the standard's provisions to explore the potential application of EPS as a structural material.

Test Specimens

The PN-EN ISO 29469:2023-05 [1] standard recommends using rectangular prism specimens for testing the compressive behaviour of materials such as EPS polystyrene. The height (dimension in the loading direction) of the specimen should correspond to the thickness of the original product. The width, i.e., the dimension of the square base of the specimen, should not be smaller than its height. The recommended base side dimensions are 50, 100, 150, 200, and 300 mm.

It should be emphasized that the relationship between the mechanical properties of the material and the shape and size of test specimens is thoroughly discussed in the literature [3]. Some studies described in the literature were conducted using cylindrical specimens. However, these studies typically focused on the potential application of EPS polystyrene as lightweight fill for road substructures and railway embankments and were performed using specimens shaped and sized according to geotechnical testing standards, including triaxial compression tests [13]. The use of such specimens may lead to an underestimation of the compression modulus of elasticity compared to rectangular prism specimens [3]. The size of test specimens also has a significant impact on the mechanical parameters of EPS polystyrene. It has been demonstrated that as the specimen size increases, both compressive strength and, more importantly, stiffness also increase [3]. In this context, the standard's recommendation [1] to use specimens with

go współpracy z innymi komponentami konstrukcyjnymi. W tym kontekście trzeba zwrócić uwagę na potrzebę rzetelnej oceny parametrów mechanicznych polistyrenu EPS. Wynika to z faktu, że normy [1] oraz [7 ÷ 11] wskazują na konieczność oceny przede wszystkim tych właściwości mechanicznych polistyrenu, które są istotne z punktu widzenia jego dotychczasowego, tj. przeważnie niekonstrukcyjnego zastosowania.

W artykule omówiono wybrane zapisy normy PN-EN ISO 29469:2023-05 [1], dotyczące metody badań i sposobu oceny wyników próby ściskania polistyrenu EPS, w kontekście wiedzy zdobytej z przeglądu literatury i wyników badań własnych, przeprowadzonych we współpracy z jednym z największych w kraju producentów styropianu bardzo dobrej jakości. We wskazanej normie podano wytyczne umożliwiające wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie oraz modułu odkształcenia podłużnego w warunkach krótkotrwałych obciążeń ściskających, w temperaturze otoczenia (ok. 23°C). W praktyce to właśnie wyniki próby ściskania stanowią podstawę do wstępnego wyboru odmiany polistyrenu EPS do zastosowania wymagającego przenoszenia obciążeń. Otrzymane w ten sposób wyniki są często wykorzystywane przez producentów styropianu do kontroli jego jakości, a powszechną praktyką jest wskazywanie wyznaczonej doświadczalnie wytrzymałości na ściskanie [kPa] w nazwie handlowej produktów, np. płyt do izolacji termicznej podłóg [12]. W artykule podano również propozycje uzupełnienia zapisów normy w kontekście możliwości zastosowania polistyrenu w roli materiału konstrukcyjnego.

Elementy próbne

Norma PN-EN ISO 29469:2023-05 [1] rekomenduje, żeby do badania zachowania przy ściskaniu materiałów, takich jak polistyren EPS używać próbek prostopadłościennych, o wysokości (wymiar na kierunku obciążenia) odpowiadającej grubości oryginalnego wyrobu. Szerokość, tj. wymiar kwadratowej podstawy próbki, nie powinna być przy tym mniejsza od jej wysokości. Zaleca się stosowanie próbek o wymiarach boku podstawy: 50; 100; 150; 200 i 300 mm.

Należy podkreślić, że w literaturze dokładnie omawiana jest zależność między parametrami mechanicznymi materiału oraz kształtem i wymiarami elementów próbnych [3]. Część badań opisanych w literaturze prowadzona była z wykorzystaniem próbek cylindrycznych. Badania te dotyczyły jednak zazwyczaj możliwości zastosowania polistyrenu EPS w roli lekkiego wypełnienia podbudowy dróg i nasypów kolejowych i wykonywane były z użyciem próbek o kształcie i wymiarach stosowanych w badaniach geotechnicznych, m.in. w próbach trójosiowego ściskania [13]. Stosowanie takich próbek może jednak prowadzić do zaniżenia wartości modułu odkształcenia podłużnego w porównaniu z próbkami prostopadłościennymi [3]. Bardzo duży wpływ na wielkość parametrów mechanicznych polistyrenu EPS mają również wymiary elementów próbnych. Dowiedziono, że wraz ze zwiększeniem tych wymiarów zwiększa się również wytrzymałość na ściskanie oraz przede wszystkim sztywność badanych elementów [3]. W tym kontekście zrozumiałe jest zalecenie normy [1], żeby do badań używać elementów o grubości oryginalnego wyro-

the original product thickness is understandable. However, testing large specimens may pose challenges for polystyrene manufacturers due to the limited capabilities of in-house testing equipment. Access to facilities available in large research institutions (e.g., universities) may be required. Furthermore, the results of such tests are difficult to directly compare with those obtained from smaller specimens. For these reasons, cubic specimens with a 50 mm side length are commonly used for quality control of EPS polystyrene products. The test results obtained in this manner represent the lower limit of the material's mechanical parameters and are often treated as reference values for the preliminary selection of EPS grades for specific applications.

For surface preparation of the specimens, the use of a heated resistance wire is recommended, as it does not significantly alter the material's structure compared to the original product and thus meets the requirements of the standard [1]. It is important to note that resistance wire cutting is commonly used in the processing of original products, such as when cutting insulation boards from polystyrene blocks.

According to the standard [1], specimens should be conditioned in laboratory conditions for at least 6 hours at approximately 23°C before testing. This process aims to remove residual moisture introduced during production, which could significantly affect the measurement of polystyrene density and, consequently, lead to issues in interpreting compression test results. As discussed in this paper, there is a strong correlation between polystyrene density and its mechanical properties. For any newly manufactured material, the initial conditioning process is typically conducted at the production facility. During this process, polystyrene undergoes degassing, where n-pentane and isopentane – used as blowing agents in EPS production – escape from the material's structure. Through diffusion, air replaces these gases within the structure, providing the material with the necessary stability and the required mechanical and insulating properties.

Testing Procedure

During the test, specimens are axially compressed in a monotonic manner using a testing machine, typically until a predetermined strain level is reached. The standard [1] recommends continuing the test at least until the relative strain ϵ reaches 10% (as this is the basis for determining compressive strength), unless the specimen fails earlier. Numerous studies on EPS polystyrene with varying densities have shown that this material is capable of undergoing large deformations, reaching up to 90% strain while still maintaining its ability to bear loads [14, 15]. The loading rate is related to the relative strain of the material and should be $\epsilon = 10\%/min$. As demonstrated in many studies, this rate represents the threshold value at which the loading can still be considered static [3, 16]. A significant portion of the literature includes studies in which test specimens were loaded

bu. Badanie elementów o dużych wymiarach może jednak wiązać się w przypadku producentów styropianu z pewnymi trudnościami, wynikającymi przede wszystkim z ograniczonych możliwości przyzakładowych urządzeń badawczych. Może być wówczas wymagany dostęp do stanowisk, którymi dysponują laboratoria dużych instytucji badawczych (m.in. uczelni wyższych). Co równie ważne, wyniki takich badań trudno jednoznacznie odnieść do wyników prób prowadzonych na mniejszych próbkach. Z tych powodów do celów kontroli jakości wyrobów z polistyrenu EPS powszechnie stosowane są próbki sześciennie o wymiarze boku 50 mm. Uzyskane w ten sposób wyniki badań reprezentują dolną granicę parametrów mechanicznych materiału i dlatego są często traktowane jako wielkości referencyjne do celów wstępnego wyboru odmiany polistyrenu do konkretnego zastosowania.

Do obróbki powierzchni bocznych próbek rekomenduje się stosowanie rozgrzanego drutu oporowego, co nie powoduje istotnej zmiany struktury materiału w porównaniu z wyrobem oryginalnym, a zatem spełnia w tym zakresie wymagania normy [1]. Należy podkreślić, że cięcie z użyciem drutu oporowego stosowane jest zazwyczaj w procesie obróbki oryginalnych wyrobów, np. podczas wycinania płyt izolacyjnych z bloków polistyrenu.

Zgodnie z zapisem normy [1], próbki przed badaniem należy klimatyzować w warunkach laboratoryjnych przez co najmniej 6 h, w temperaturze ok. 23°C. Zabieg ten ma na celu usunięcie resztkowej wilgoci ze struktury materiału, wprowadzonej w procesie produkcji. Wilgoć ta może w sposób istotny wpłynąć na wyniki pomiarów gęstości polistyrenu, a w efekcie prowadzić do problemów związanych z interpretacją wyników próby ścisania. Jak przedstawiono w artykule, istnieje bowiem ścisły związek pomiędzy gęstością i parametrami mechanicznymi polistyrenu. W przypadku każdego nowo wyprodukowanego materiału wstępny proces klimatyzowania przeprowadzany zazwyczaj jest jeszcze w zakładzie produkcyjnym. W procesie tym dochodzi do odgazowania polistyrenu. Ze struktury materiału uchodzą wówczas n-pentan i izopentan, stosowane jako środki spieniające w procesie produkcji polistyrenu EPS, a w ich miejsce (przez dyfuzję) do wnętrza struktury dostaje się powietrze, nadając materiałowi odpowiednią stabilność oraz wymagane właściwości mechaniczne i izolacyjne.

Procedura badawcza

Podczas badania próbki są ściskane osiowo w sposób monotoniczny w maszynie wytrzymałościowej, zazwyczaj do momentu osiągnięcia ustalonej wartości odkształcenia. Norma [1] zaleca, żeby badanie kontynuować przynajmniej do chwili osiągnięcia odkształceń względnych ϵ na poziomie 10% (co jest związane ze sposobem wyznaczania wytrzymałości na ściskanie), chyba że wcześniej nastąpi zniszczenie próbki. Liczne badania polistyrenu EPS o zróżnicowanej gęstości pokazały, że materiał ten jest jednak zdolny do dużych deformacji przy odkształceniu sięgającym nawet 90%, wykazując przy tym w dalszym ciągu zdolność do przenoszenia obciążenia [14, 15]. Tempo obciążania próbek odniesione jest do odkształceń względnych materiału i powinno wynosić $\epsilon = 10\%/min$. Jak wykazano w wielu opracowaniach, tempo to jest graniczną wartością, przy któ-

at rates several times higher than those specified in [1]. However, these studies typically focused on the potential use of EPS polystyrene as an impact-absorbing material. Importantly, in the context of the structural application of polystyrene, an increase in the loading rate also leads to an increase in the compression modulus of elasticity E . During the test, force applied to the specimen and its deformation in the loading direction are measured. The recorded values allow for the determination of the relationship between stress σ and strain ε in the material.

Test Results

The figure shows an example of the σ - ε relationship obtained for EPS 100 polystyrene with a nominal density of 20 kg/m^3 . As seen, in the initial working range of the material – after eliminating initial gaps caused by inaccuracies in the contact between the loading plate and the sample surface, and after stabilizing strain measurements – the σ - ε relationship exhibits a linear character. As demonstrated in [17], the presence of a concave, arc-shaped transition segment between the initial deformation region and the linear range is not a specific property of polystyrene but rather results from inaccuracies in the contact between the loading plate and the sample surface. In the linear working range of the material, free spaces within the structure between the material cells are reduced without significant changes in the shape of the cells. The initial stiffness of the material is provided by the compression of the air trapped within the cells [18]. It is in this region, where the σ - ε relationship is approximately linear, that the compression modulus of elasticity E is determined (figure). The standard [1] does not explicitly define the load or deformation range for determining this modulus. However, it is commonly assumed that this range begins above the region of initial deformations and includes the linear segment of the σ - ε curve.

Experimental results indicate that the upper limit of the usable range for determining the E modulus may depend on material density [3]. For the most commonly used EPS polystyrene densities in practice, the linear working range is limited to strain levels within the conventional elastic zone (measured from point ε_0) not exceeding 1% (figure) [19]. Interestingly, some studies suggest that the strictly elastic range of this material often does not exceed strain levels of 0.5% [20]. It is also worth noting that the value of the E modulus is significantly affected by the content of recycled regranulate added during the production of polystyrene blocks. The use of regranulate results from the implementation of circular economy principles, which are an important element of the current climate policy. However, from a structural application perspective, an increase in regranulate content leads to a decrease in the E modulus [3].

By increasing the load along the σ - ε curve, a growth in permanent deformations can be observed. The arc-shaped transition to the next approximately linear segment is often simplistically referred to as the plasticization region, most likely due to the similarity of the σ - ε curves to those obtained

rej można uznać, że próbka obciążona jest w sposób statyczny [3, 16]. Dużą reprezentację w literaturze mają badania, w których elementy próbne obciążane były w tempie kilkakrotnie większym niż wskazane w [1]. Badania te dotyczyły jednak zwykle możliwości zastosowania polistyrenu EPS w roli materiału absorbującego uderzenia. Co ważne, w kontekście konstrukcyjnego zastosowania polistyrenu, wraz ze wzrostem tempa obciążenia zwiększa się również wartość modułu odkształcenia podłużnego E . Podczas badania dokonywane są pomiary siły działającej na element próbny oraz deformacji próbki na kierunku obciążenia. Zmierzone wielkości pozwalają na wyznaczenie zależności między naprężeniami σ i odkształceniami ε w materiale.

Wyniki badań

Na rysunku pokazano przykładową zależność σ - ε otrzymaną w przypadku polistyrenu EPS 100 o nominalnej gęstości 20 kg/m^3 . Jak widać, w początkowym zakresie pracy materiału, tj. po wyeliminowaniu wstępnych luzów wynikających z niedokładności przylegania płyty obciążającej do powierzchni próbki, a także ustabilizowaniu pomiarów odkształceń zależność σ - ε ma charakter liniowy. Jak wykazano, m.in. w [17], obecność wklęsłego odcinka o łukowym kształcie, przy przejściu zależności z obszaru początkowych deformacji do zakresu liniowego, nie jest specyficzną właściwością polistyrenu, ale również wynika z niedokładności przylegania do siebie powierzchni płyty obciążającej i próbki. W liniowym zakresie pracy materiału dochodzi do zmniejszenia wolnych przestrzeni w strukturze między ziarnami materiału, bez zauważalnej zmiany kształtu tych ziaren. Początkowa sztywność materiału zapewniana jest przez kompresję powietrza zamkniętego w ziarnach [18]. To w tym obszarze, gdzie zależność σ - ε ma przebieg zbliżony do liniowego, wyznaczana jest wartość modułu odkształcenia podłużnego E (rysunek). W normie [1] brakuje jednoznacznego określenia zakresu obciążenia lub deformacji, przy których należałoby ustalać wartość tego modułu, ale przyjęło się, że rozpoczyna się on powyżej obszaru występowania początkowych deformacji i obejmuje fragment zależności σ - ε o przebiegu liniowym.

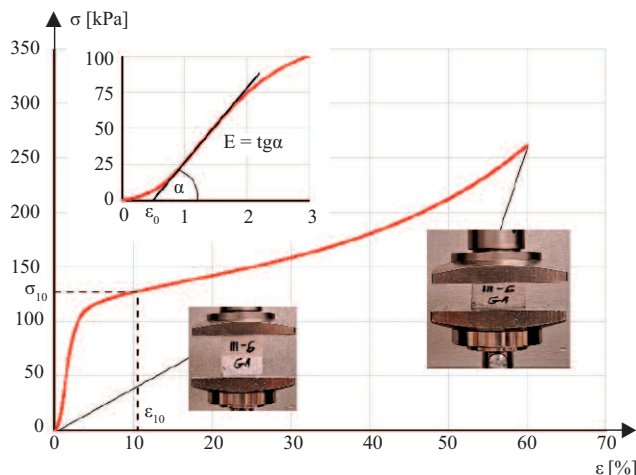
Jak pokazują wyniki badań doświadczalnych, górna granica zakresu użytecznego do wyznaczania wartości modułu E może być uzależniona od gęstości materiału [3]. W przypadku najczęściej stosowanej w praktyce gęstości polistyrenu EPS liniowy zakres pracy zamyka się w przedziale odkształceń w umownej strefie sprężystości (tj. mierzonych od punktu ε_0) nieprzekraczających 1% (rysunek) [19]. Co ciekawe, rezultaty niektórych badań wskazują również, że zakres stricte sprężystej pracy tego materiału często nie przekracza odkształceń na poziomie 0,5% [20]. Warto w tym miejscu również zauważyć, że na wartość modułu E duży wpływ ma zawartość regranulatu pochodzącego z recyklingu, dodawanego w procesie produkcji bloków styropianowych. Dodatek regranulatu wynika z realizacji przez producentów styropianu postulatów gospodarki o obiegu zamkniętym, która jest ważnym elementem obowiązującej obecnie polityki klimatycznej. Co jednak istotne, z punktu widzenia konstrukcyjnego zastosowania polistyrenu EPS, wraz ze wzrostem ilości regranulatu zmniejsza się wartość modułu E [3].

for materials such as steel. However, the observed increase in permanent deformations is not related to plasticization of the material structure but rather results from the irreversible damage to cell walls due to the pressure of the air inside them. When the air escapes from these cells, a sudden decrease in stiffness of the tested element occurs. The flattening segment of the σ - ϵ curve typically extends to strain levels of approximately 40% to 50%. As shown in [12], doubling the specimen thickness resulted in a threefold extension of this segment.

This suggests that its length increases with the specimen thickness. This property of EPS polystyrene, which highlights its ability to absorb impact energy, is widely utilized in the design of bicycle helmets and protective packaging for fragile products [21 ÷ 23].

According to the standard, at a relative strain level of $\epsilon_{10} = 10\%$, the compressive strength of polystyrene, σ_{10} , is determined. This is why the standard earlier recommended a required deformation level for the tested material. However, at this strain level, no noticeable failure effects, such as brittle cracking, are observed. This strain level was arbitrarily set and may vary depending on the intended application of the material [2]. Despite some concerns in the literature regarding the determination of compressive strength at such high deformations – particularly in relation to the potential use of polystyrene as a structural material – the adopted method has certain advantages. Compressive strength is always determined beyond the plasticization region (where the σ - ϵ relationship is nonlinear), along a relatively straight section of the σ - ϵ curve with minimal stress increase. As a result, the obtained values exhibit high repeatability. This ensures satisfactory repeatability of results even when the zero-deformation point ϵ_0 is not precisely determined (figure). This characteristic of the testing method is a significant advantage, especially when using software for the automatic determination of modulus E , which, as observed, is not always capable of correctly interpreting results when the analysed curve deviates significantly from the typical pattern.

In the third phase of EPS polystyrene behaviour, typically at relative strains exceeding 40%, nearly all cell walls forming the grains are damaged. Consequently, these cells flatten, and the material structure becomes more compact. This phenomenon is accompanied by a significant increase in the stiffness of the tested element (figure). Although this may seem irrelevant from the perspective of EPS polystyrene's structural



Example of the σ - ϵ relationship for EPS polystyrene with a nominal density of 20 kg/m^3 obtained from the own tests of a cubic sample with a side dimension of 50 mm

Przykładowa zależność σ - ϵ w przypadku polistyrenu EPS o nominalnej gęstości 20 kg/m^3 otrzymana z badań własnych próbki sześcienniej o boku 50 mm

Zwiększając obciążenie na krzywej σ - ϵ można zarejestrować przyrost deformacji trwałych. Odcinek łukowego przejścia do kolejnego odcinka o przebiegu zbliżonym do liniowego, często określany jest w sposób uproszczony jako obszar uplastycznienia, najprawdopodobniej przez podobieństwo wyznaczonych krzywych σ - ϵ do tych, otrzymywanych w przypadku takich materiałów, jak np. stal. Obserwowany przyrost deformacji trwałych nie jest jednak związany z uplastycznieniem struktury materiału, ale wynika z nieodwracalnego uszkodzenia ścian komórek przez ciśnienie powietrza znajdującego się w ich wnętrzu. W momencie, gdy powietrze wydostaje się z tych komórek, następuje gwałtowne

zmniejszenie sztywności badanego elementu. Odcinek wypłaszczenia krzywej σ - ϵ sięga zazwyczaj odkształceń rzędu 40% lub 50%. Jak wykazano w [12], dwukrotne zwiększenie grubości próbki przełożyło się na trzykrotne wydłużenie omawianego odcinka. Wynika z tego, że długość ta zwiększa się wraz ze wzrostem grubości elementu próbnego. Ta właściwość polistyrenu EPS, wskazująca m.in. na jego zdolność do absorbowania energii uderzeń, jest powszechnie wykorzystywana w konstrukcjach kasków rowerowych oraz opakowań zabezpieczających produkty podatne na uszkodzenie [21 ÷ 23].

Zgodnie z zapisem normy, na poziomie odkształceń względnych $\epsilon_{10} = 10\%$ określana jest wytrzymałość polistyrenu na ściskanie σ_{10} . Stąd również wcześniejsza rekomendacja normy, dotycząca wymaganego poziomu odkształceń badanego materiału. Na wskazanym poziomie odkształceń względnych nie obserwuje się jednak zauważalnych efektów zniszczenia, np. w postaci kruchych pęknięć. Poziom tych odkształceń został bowiem narzucony arbitralnie i może się różnić w zależności od przewidywanego zastosowania materiału [2]. Pomimo wyrażanych w literaturze pewnych wątpliwości, dotyczących wyznaczania wytrzymałości na ściskanie na poziomie tak dużych odkształceń, szczególnie w odniesieniu do możliwości zastosowania polistyrenu jako materiału konstrukcyjnego, przyjęta metoda ma jednak pewne zalety. Wytrzymałość określana jest bowiem zawsze poza obszarem uplastycznienia (gdzie zależność σ - ϵ ma przebieg nieliniowy), na długości relatywnie prostego odcinka krzywej σ - ϵ przy niewielkim przyroście naprężeń, dlatego też otrzymane rezultaty charakteryzuje duża powtarzalność. Dzięki temu zadowalająca powtarzalność wyników osiągnięta jest również w przypadku nieprecyzyjnego wyznaczenia punktu zerowych odkształceń ϵ_0 (rysunek). Ta ostatnia cecha omawianej metody badania stanowi jej duży atut, szczególnie w przypadku zastosowania oprogramowania do automatycznego wyznaczenia modułu E , które nie zawsze jest w stanie (jak się przekonano) dokonać właściwej interpretacji wyników w sytuacji, kiedy przebieg analizowanej krzywej różni się znacznie od typowego.

performance – due to the very high deformations involved – it is worth noting the material's ability to continue bearing loads without signs of cracking or disintegration that could indicate the possibility of sudden failure.

Proposal for supplementing standard provisions

The relationship between the density of EPS polystyrene and its compressive strength as well as its compression modulus of elasticity is extensively discussed in the literature [24]. The dependence of these mechanical parameters on material density is typically linear. However, the density of EPS polystyrene within different parts of a block can vary by as much as 25% [19]. Such significant variations in density and mechanical properties, particularly in the EE modulus, within a single batch of material could be crucial for the structural application of EPS polystyrene. Therefore, it seems important to supplement the standard provisions with guidelines specifying both the location within the block or panel where samples should be taken and the required number of samples to ensure that the obtained results accurately represent the entire tested element (e.g., a panel or block). The study in [19], supported by our own research findings, indicates that in the case of a polystyrene block, twice as many samples should be taken from locations closer to the external surfaces of the block compared to its core region.

Given the increasing interest in using polystyrene as a structural material, the standard should also be expanded to include descriptions of test procedures necessary for evaluating the Poisson's ratio ν under compression. Precisely determining this coefficient is essential for a comprehensive understanding of polystyrene's behaviour as a structural component (e.g., in buildings [6]). The assessment of this coefficient has often been conducted in conjunction with tests aimed at determining compressive strength and the compression modulus of elasticity. However, the testing methods and result interpretation approaches have varied significantly, leading to reported ν values in the literature ranging from 0 to 0.5 [16, 25], with the most commonly reported values falling within the range of 0.1 to 0.2. This demonstrates that the topic of reliably assessing the Poisson's ratio requires standardization and clear inclusion in normative provisions.

Summary

This study reviews and evaluates the provisions of the PN-EN ISO 29469:2023-05 standard regarding the preparation of test specimens, testing procedures, and the assessment of compression results for EPS polystyrene. The standard's provisions are analysed in the context of research findings from the literature and our own studies. As demonstrated, the range of mechanical parameters included in the standard, which describe the behaviour of EPS polystyrene under compression, is sufficient for its traditional application as an

W trzeciej fazie pracy polistyrenu EPS, tj. zazwyczaj przy odkształceniach względnych przekraczających 40%, dochodzi do uszkodzenia ścianek niemal wszystkich komórek tworzących ziarna. W wyniku tego komórki te ulegają spłaszczeniu, a struktura materiału zagęszczeniu. Zjawisku temu towarzyszy duże zwiększenie sztywności badanego elementu (rysunek). Pomimo że może to wydawać się nieistotne z punktu widzenia pracy polistyrenu EPS w konstrukcji, ze względu na towarzyszące temu zjawisku bardzo duże odkształcenia, to jednak warta zauważenia jest zdolność tego materiału do dalszego przenoszenia obciążeń bez oznak pęknięć i dezintegracji materiału, mogących wskazywać na możliwość jego gwałtownego zniszczenia.

Propozycja uzupełnienia zapisów normowych

W literaturze przedmiotu dokładnie omawiana jest zależność między gęstością polistyrenu EPS a jego wytrzymałością na ściskanie i wartością modułu odkształcenia podłużnego [24]. Zależność tych parametrów mechanicznych od gęstości materiału zazwyczaj ma charakter liniowy. Tymczasem gęstość polistyrenu EPS w różnych częściach bloku może różnić się aż o 25% [19]. Tak duże zróżnicowanie gęstości i parametrów mechanicznych, a przede wszystkim modułu E, w jednej partii materiału może mieć znaczenie z punktu widzenia konstrukcyjnego zastosowania polistyrenu EPS. Ważne zatem wydaje się uzupełnienie zapisów normy o wskazania zarówno lokalizacji w bloku lub płycie, w której należy pobierać próbki, jak i liczby pobranych próbek, aby otrzymane wyniki były miarodajne w przypadku całego badanego elementu (np. płyty lub bloku). W opracowaniu [19] wykazano, co potwierdzają również wyniki badań własnych, że w przypadku bloku styropianowego należałoby pobrać dwukrotnie większą liczbę próbek z miejsc zlokalizowanych bliżej powierzchni zewnętrznych bloku niż z obszaru jego rdzenia.

Ze względu na zwiększające się zainteresowanie wykorzystaniem polistyrenu w roli materiału konstrukcyjnego zapisy normy należałoby również uzupełnić o opis procedur badawczych, potrzebnych do oceny współczynnika Poissona ν przy ścisaniu. Precyzyjne określenie wartości tego współczynnika potrzebne jest bowiem do pełnego opisu zachowania się polistyrenu jako komponentu konstrukcji nośnej (np. budynku [6]). Zadanie dotyczące oceny wartości tego współczynnika często realizowane było przy okazji badań mających na celu wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie i modułu odkształcenia podłużnego. Stosowane przy tym metody badawcze i sposób interpretacji wyników znacznie różniły się jednak między sobą, dlatego też wskazywane w literaturze wartości współczynnika ν wahają się od 0 do 0,5 [16, 25], przy najczęściej raportowanych wartościach ν rzędu $0,1 \div 0,2$. Widać zatem, że temat wiarygodnej oceny współczynnika Poissona wymaga uporządkowania i jednoznacznego ujęcia w zapisach normowych.

Podsumowanie

W opracowaniu dokonano przeglądu i oceny zapisów normy PN-EN ISO 29469:2023-05 dotyczących przygotowania elementów próbnych oraz procedury badań i oceny wyników ści-

insulating material without a structural function. However, the potential structural use of EPS polystyrene, such as in a self-supporting composite building partition, necessitates updating the standard to include guidelines on sample location within the product (e.g., an insulation panel), the number of samples required, and the procedure for determining the Poisson's ratio.

Received: 09.12.2024

Revised: 07.01.2025

Published: 25.04.2025

skania polistyrenu EPS. Zapisy normy omówiono na tle rezultatów badań przedstawionych w literaturze przedmiotu oraz badań własnych. Jak pokazano, zakres ujętych w normie parametrów mechanicznych, opisujących zachowanie polistyrenu EPS w warunkach ściskania, jest wystarczający z punktu widzenia dotychczasowego jego zastosowania jako materiału izolacyjnego, niemającego funkcji konstrukcyjnej. Możliwość konstrukcyjnego zastosowania polistyrenu EPS, np. w roli komponentu samonośnej przegrody kompozytowej budynku, wymaga jednak uzupełnienia zapisów w normie, dotyczących zarówno lokalizacji próbek w wyrobie (np. płycie izolacyjnej) oraz liczby tych próbek, jak i procedury wyznaczania współczynnika Poissona.

Artykuł wpłynął do redakcji: 09.12.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 07.01.2025 r.

Opublikowano: 25.04.2025 r.

Literature

- [1] PN-EN ISO 29469:2023-05 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Określanie zachowania przy ściskaniu.
- [2] PN-EN 14933 Lekkie wyroby wypełniające i izolacyjne do zastosowań w budownictwie lądowym i wodnym. Wyroby ze styropianu (EPS) produkowane fabrycznie. Specyfikacja.
- [3] Stark TD, Arellano D, Leshchinsky D, Horvath J. Geofam Applications in the Design and Construction of Highway Embankments. 2004. Available: www.TRB.org.
- [4] Deshmukh R, Iyer S, Bhargava P. Geotechnical characterization of Expanded polystyrene (EPS) beads with industrial waste and its utilization in flexible pavement. Mater Today Proc. 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.462.
- [5] PN-EN 14509:2013-12 Samonośne izolacyjno-konstrukcyjne płyty warstwowe z dwustronną okładziną metalową. Wyroby fabryczne. Specyfikacje.
- [6] <https://www.inwestycje.plus/nowoczesne-budownictwo-na-miare-wymagan-transformacji-energetycznej-budownictwo-zeroemisyjne/>.
- [7] PN-EN 13163+A2:2016-12 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Wyroby ze styropianu (EPS) produkowane fabrycznie. Specyfikacja.
- [8] PN-EN 1607:2013-07 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Określanie wytrzymałości na rozciąganie prostopadłe do powierzchni czołowych.
- [9] PN-EN 12089:2013-07 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Określanie zachowania przy zginaniu.
- [10] PN-EN 12090:2013-07 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie – Określanie zachowania przy ścinaniu.
- [11] PN-EN ISO 16534: 2020-12 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Określanie pełzania przy ściskaniu.
- [12] <https://termoorganika.pl/produkt/setka-podloga-eps-100>.
- [13] Chun BS, Lim HS, Sagong M, Kim K. Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofam under triaxial compression tests. Geotextiles and Geomembranes. 2004. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2004.03.005.
- [14] Solomon A., Hemalatha G. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. Structures. 2020. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.10.019.
- [15] Smakosz Ł, Tejchman J. Evaluation of strength, deformability and failure mode of composite structural insulated panels. Mater Des. 2014. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.09.032.
- [16] Chen W, Hao H, Hughes D, Shi Y, Cui J, Li Z. X. Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. Mater Des. 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.12.024.
- [17] Abdelrahman GE, Tatsuoka F. Small strain-stress properties of expanded polystyrene geofam. Soils and Foundations. 2008; vol. 48, pp. 61–71.
- [18] Vaitkus S, Vėjelis S, Šeputytė-Jucikė J, Czlonka S, Strzelec K, Kairytė A. Analysis of Active and Passive Deformation of Expanded Polystyrene Foam under Short-Term Compression. Materials. 2022. DOI: 10.3390/ma15217548.
- [19] Eriksson L., Trank R. Properties of expanded polystyrene – Laboratory experiments. Stockholm, 1991.
- [20] Duškov M. Materials Research on EPS20 and EPS15 Under Representative Conditions in Pavement Structures. Geotextiles and Geomembranes. 1997. DOI: [org/10.1016/S0266-1144\(97\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(97)00011-3).
- [21] Di Landro L, Sala G, Olivieri D. Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets. Polym Tes. 2002. DOI: 10.1016/S0142-9418(01)00073-3.
- [22] Hazarika H. Stress-strain modeling of EPS geofam for large-strain applications. Geotextiles and Geomembranes. 200. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2005.11.003.
- [23] Avalle M, Belingardi G, Ibba A. Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests. Int J Impact Eng. 2007. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.06.012.
- [24] Horvath J. S. The Compressible Inclusion Function of EPS Geofam. Geotextiles and Geomembranes. 1997. DOI: [org/10.1016/S0266-1144\(97\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(97)00008-3).
- [25] By S. Manual for Expanded Polystyrene (EPS) Core Panel System and its field Application Ministry of Housing and Urban Poverty Alleviation. Government of India. 2017.