

Rozpoczynamy cykl artykułów dotyczących projektowania konstrukcji stalowych zgodnie z Eurokodem 3.

Projektowanie konstrukcji stalowych zgodnie z PN-EN 1993

Design of steel structures according to PN-EN 1993

Eurokod 3, składający się z 20 norm, dotyczy projektowania stalowych konstrukcji budowlanych. Obszerność tego pakietu norm wynika zarówno z bardzo dużego zakresu tematycznego, złożoności modeli obliczeniowych, jak i specyfiki kryteriów oceny nośności poszczególnych rodzajów konstrukcji stalowych. Normy te omawiają specyficzne zagadnienia projektowania zarówno budynków, jak i obiektów inżynierskich (mostów, wież, masztów, kominów, silosów, zbiorników, rurociągów, belek podsuwnicowych, konstrukcji z blach giętych na zimno itd.) o konstrukcji stalowej.

Z powodu rozległej tematyki, a także odmiennej filozofii i metodologii w stosunku do dotychczasowych norm polskich korzystanie z Eurokodów jest utrudnione. W wielu przypadkach podają one jedynie ideę, założenia i opisowo model analityczny, zakładając, że projektant ma wiedzę z teorii konstrukcji metalowych. Zawierają też wiele odniesień do innych części Eurokodów oraz przepisów i norm. Zastosowana metodologia, nowa nomenklatura, styl oraz układ powodują, że Eurokod 3 jest znacznie rozbudowany w porównaniu z PN-90/B-03200.

W cyklu 5 artykułów zostaną syntetycznie przedstawione podstawowe zasady projektowania konstrukcji stalowych wg Eurokodu 3. Ich zasadniczym celem jest przybliżenie założeń i zasad obliczania konstrukcji, sprawdzanie nośności przekrojów i oceny stateczności elementów wg PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3: *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków* i PN-EN 1993-1-5 Eurokod 3: *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5: Blachownice oraz wytrzymałość połączeń śrubowych i spawanych* oraz wg PN-EN 1993-1-8 Eurokod 3: *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów*. Jest to zakres tematyczny odpowiadający w przybliżeniu dotychczasowej krajowej normie

PN-90/B-03200 *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*, która dotyczy projektowania m.in. budynków.

Struktura Eurokodu 3

Strukturę norm europejskich o symbolach PN-EN 1993-X-Y, przedstawiono na rysunku 1. Poszczególne części Eurokodu 3 (o symbolu X) omawiają zagadnienia projektowania:

- budynków (część 1 – PN-EN 1993-1);
- mostów (część 2 – PN-EN 1993-2);
- wież, masztów i kominów (część 3 – PN-EN 1993-3);
- silosów, zbiorników i rurociągów (część 4 – PN-EN 1993-4);
- palowania i grodzi (część 5 – PN-EN 1993-5) oraz
- konstrukcji wsporczych suwnic (część 6 – PN-EN 1993-6).

Normy PN-EN 1993-1, PN-EN 1993-3 oraz PN-EN 1993-4 są wieloczęściowe, tj. mają podczęści (o symbolu Y), i tak np.

Eurokod PN-EN 1993-1 składa się z 12 norm:

- PN-EN 1993-1-1:2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków;
- PN-EN 1993-1-2:2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe;
- PN-EN 1993-1-3:2008. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno;
- PN-EN 1993-1-4:2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-4: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji ze stali nierdzewnych;
- PN-EN 1993-1-5:2008. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-5: Blachownice;

PN-EN 1993	Projektowanie konstrukcji stalowych
PN-EN 1993-1	Część 1-1 Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków
	Część 1-2 Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożaru
	Część 1-3 Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno
	Część 1-4 Reguły uzupełniające dla konstrukcji ze stali nierdzewnych
	Część 1-5 Blachownice
	Część 1-6 Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych
	Część 1-7 Konstrukcje płytowe
	Część 1-8 Projektowanie węzłów
	Część 1-9 Zmęczenie
	Część 1-10 Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągłość międzywarstwową
	Część 1-11 Konstrukcje ciągnowe
	Część 1-12 Reguły dodatkowe rozszerzające zakres stosowania EN 1993 o gatunki stali wysokiej wytrzymałości do S700 włącznie
PN-EN 1993-2	Część 3-2 Mosty stalowe
PN-EN 1993-3	Część 3-1 Wieże, maszty i kominy – Wieże i maszty
	Część 3-2 Wieże, maszty i kominy – Kominy
PN-EN 1993-4	Część 4-1 Silosy
	Część 4-2 Zbiorniki
	Część 4-3 Rurociągi
PN-EN 1993-5	Część 3-5 Palowanie i ścianki szczelne
PN-EN 1993-6	Część 3-6 Konstrukcje wsporcze suwnic

Rys. 1. Schemat Eurokodu 3 *Projektowanie konstrukcji stalowych*

■ PN-EN 1993-1-6:2009. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych;

■ PN-EN 1993-1-7:2009 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-7: Konstrukcje płytowe;

■ PN-EN 1993-1-8:2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów;

■ PN-EN 1993-1-9:2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-9: Zmęczenie;

■ PN-EN 1993-1-10:2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową;

■ PN-EN 1993-1-11:2008 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-11: Konstrukcje ciągnowe;

■ PN-EN 1993-1-12:2009. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-12: Reguły dodatkowe rozszerzające zakres stosowania EN 1993 o gatunki stali wysokiej wytrzymałości do S700 włącznie.

PN-EN 1993-1-1:2006 podaje podstawowe zasady projektowania konstrukcji stalowych z materiału o grubości ścianek $t \geq 3$ mm, a także przepisy dodatkowe dotyczące budynków mające ogólne zastosowanie (do wszystkich obiektów).

Zasady ogólne

W postanowieniach ogólnych dotyczących PN-EN 1993-1-1 podano, że należy go stosować w powiązaniu z innymi Eurokodami, a przede wszystkim: PN-EN 1990:2004 *Podstawy projektowania konstrukcji*; PN-EN 1991 *Oddziaływania na konstrukcje*; PN-EN 1090-2:2009 *Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych – Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych* oraz normami wyrobów ze stali konstrukcyjnej spawalnej (PN-EN 10025-1:2004, PN-EN 10025-2:2004, ..., PN-EN 10219-1:1997).

W założeniach wyjściowych przedstawiono symbole i terminy stosowane w PN-EN 1993-1-1. Ponadto podano następujące dodatkowe (w stosunku do PN-EN 1990) podstawowe definicje związane z projektowaniem budynków o konstrukcji stalowej.

Analiza globalna – wyznaczenie spójnego zbioru sił wewnętrznych i momentów zginających (M_{Ed} , N_{Ed} , V_{Ed}) w konstrukcji,

które są w równowadze z określonym zbiorem oddziaływań zewnętrznych.

Długość teoretyczna – długość między sąsiednimi punktami bocznego podparcia lub punktem podparcia i jego końcem (np. wspornik) w rozpatrywanej płaszczyźnie wybożenia.

Długość wybożeniowa – długość teoretyczna elementu podpartego przegubowo (analogicznego pod każdym względem), który ma taką samą, jak rozpatrywany element, nośność krytyczną przy wybożeniu.

Efekt szerokiego pasa – nierównomierny rozkład naprężeń normalnych w szerokich pasach, spowodowany odkształceniami postaciowymi w ich płaszczyźnie; efekt ten uwzględnia się, stosując tzw. szerokość współpracującą.

Przekrój współpracujący i szerokość współpracująca – przekrój zredukowany lub szerokość zredukowana ze względu na niestateczność ścianki, efekt szerokiego pasa lub oba te efekty łącznie; nazwy używane w odniesieniu do zjawiska niestateczności miejscowej.

Ustrój prętowy (szkieletowy) – konstrukcja lub jej część, złożona z bezpośrednio połączonych elementów prętowych, zaprojektowana do przenoszenia obciążeń. Termin ten odnosi się zarówno do ustrojów ramowych, jak i kratowych. Obejmuje zarówno ustroje płaskie, jak i przestrzenne. Prętowe ustroje nośne w aspekcie połączeń (węzłów) oraz analizy globalnej, obejmują następujące kategorie układów:

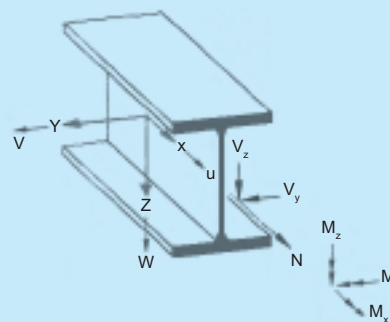
- **niepełnościągłe**, w których zarówno właściwości elementów, jak i właściwości węzłów wymagają uwzględnienia w analizie (konstrukcje o węzłach podatnych);
- **pełnościągłe**, w których wyłącznie właściwości elementów wymagają uwzględnienia w analizie (konstrukcje o węzłach sztywnych);
- **proste**, w których węzły nie są zaprojektowane do przenoszenia momentów zginających (konstrukcje o węzłach przegubowych).

W przypadku konstrukcji z węzłami podatnymi (w ustrojach niepełnościągłych) należy w analizie statycznej uwzględnić parametry sztywnościowe połączenia. Szczegółowe zasady oceny nośności i sztywności węzłów podano w PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3: *Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów*.

W PN-EN 1993-1-1 występuje wiele nowych oznaczeń, m.in. wprowadzono

odmienny od stosowanego w normie PN-90/B-03200 system oznaczania osi głównych przekrojów i elementów, parametrów wytrzymałościowych stali, wartości obliczeniowych sił wewnętrznych i nośności, współczynników niestateczności itd. W tym kontekście należy odnotować następujące zmiany.

Główne osie przekroju poprzecznego (rysunek 2):



Rys. 2. Oznaczenie osi przekroju poprzecznego elementów stalowych wg PN-EN 1993-1-1

- $y-y$ – oś największej bezwładności (wg PN-90/B-03200 to oś $x-x$);
- $z-z$ – oś najmniejszej bezwładności (wg PN-90/B-03200 to oś $y-y$);
- $x-x$ – oś podłużna elementu (wg PN-90/B-03200 to oś $z-z$).

Parametry wytrzymałościowe stali:
 f_y – granica plastyczności stali (wg PN-90/B-03200 to R_{eH});

f_u – wytrzymałość stali na rozciąganie (wg PN-90/B-03200 to R_m).

Wartości obliczeniowe – schemat zapisu:

X – efekt oddziaływań (np. $X = N$ – siła osiowa, $X = V$ – siła poprzeczna, $X = M$ – moment zginający);

X_{Ed} – obliczeniowy efekt oddziaływań (np. N_{Ed} , V_{Ed} , M_{Ed} , ...); (wg PN-90/B-03200 obliczeniowy efekt oddziaływań to: N , V , M , ...);

X_{Rd} – nośność obliczeniowa – stowarzyszona z X (np. $N_{t,Rd}$ – nośność przekroju na rozciąganie; $N_{c,Rd}$ – nośność przekroju na ściskanie; $N_{b,Rd}$ – nośność elementu na wybożenie, $V_{c,Rd}$ – nośność przekroju na ścinanie; $M_{c,Rd}$ – nośność przekroju na zginanie względem włókien ściskanych); wg PN-90/B-03200 odpowiednie nośności określano symbolami:

$$N_{Rd}^t, N_{Rd}^c, V_{Rd}, M_{Rd}, \dots$$

Współczynniki niestateczności ogólnej (redukcyjne):

χ – współczynnik wybożenia (φ – wg PN-90/B-03200);

χ_{LT} – współczynnik zwichrzenia (φ_L – wg PN-90/B-03200).

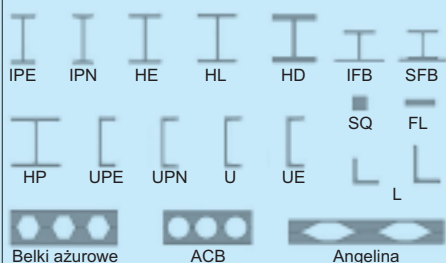
Materiały

Istotny postęp w dziedzinie hutnictwa, jaki nastąpił w ostatnich latach, spowodował zmiany właściwości oraz składu chemicznego produkowanych obecnie stali konstrukcyjnych stosowanych w budownictwie. Ma to odzwierciedlenie w Eurokodzie 3.

W PN-EN 1993-1-1 zaleca się stosowanie większej liczby gatunków stali konstrukcyjnych niż w dotychczasowej normie PN-90/B-03200. Współczesne technologie wytwarzania obecnych gatunków stali wg zmienionych europejskich norm hutniczych sprawiają, iż nie ma bezpośredniego przejścia z dawnych (wg PN-90/B-03200) gatunków stali na gatunki nowe (wg PN-EN 1993-1-1). Pod względem wytrzymałości odpowiednikiem stali St3 jest stal S235, a stali 18G2 – stal S355, ale pod względem jakości tych stali różnice są bardzo duże.

Eurokod PN-EN 1993-1-1 dotyczy projektowania budowlanych konstrukcji stalowych ze stali o granicy plastyczności $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$. Dodatkowe reguły projektowania konstrukcji stalowych, które rozszerzają zakres stosowania PN-EN 1993-1-1 o stal wyższej wytrzymałości (o granicy plastyczności $f_y = 460 - 700 \text{ N/mm}^2$), zawarto w PN-EN 1993-1-12.

Obecnie produkowane stale mają lepszą jakość niż produkowane dawniej, m.in. charakteryzują się większą jednorodnością pod względem budowy krystalicznej i składu chemicznego (m.in. uzyskano skuteczniejszą eliminację niepożądanych zanieczyszczeń związkami siarki i fosforu). Dzięki nowoczesnym procesom walcowania i obróbki cieplnej gotowych wyrobów uzyskuje się blachy i kształtowniki (rysunek 3) o małych naprężeniach własnych walcowniczych oraz jednorodnej budowie krystalicznej. Stal walcowana w gotowych wyrobach może być poddana obróbce w postaci ulepszenia cieplnego, które polega



Rys. 3. Przykłady przekrojów poprzecznych kształtowników walcowanych na gorąco

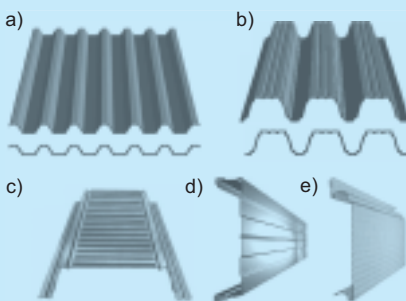
na sekwencyjnym hartowaniu i odpuszczaniu. Oferowane są także dźwigary ażurowe produkowane w sposób przemysłowy, z zastosowaniem odpowiednich technologii (na liniach automatycznego cięcia, prostowania i spawania). W wyniku ciągle poszerzanej oferty gatunków stali istnieje możliwość doboru wyrobów stalowych z uwagi na zróżnicowane wymagania eksploatacyjne oraz kryteria ekonomiczne.

Obniżenie ciężaru, kosztów wytwarzania i montażu konstrukcji stalowych uzyskuje się, stosując m.in. kształtowniki cienkościennie, np. wyroby kształtowane na zimno – otrzymywane w wyniku zagięcia (profilowania) płaskiej blachy (taśmy, arkusza) w temperaturze otoczenia. Nazywa się je często skrótowo kształtownikami giętymi (rysunek 4) o jednakowej grubości ścianek. Materiałem wyjściowym kształtowników jest taśma grubości $1 \leq t \leq 6 \text{ mm}$. W przypadku stalowych elementów osłonowych budynków (blach fałdowych – rysunek 5a, b, c, kaset ściennych – rysunek 5d, płyt elewacyjnych – rysunek 5e) stosuje się blachy grubości $0,5 \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$. Ukształtowane w ten sposób wyroby stalowe wykazują sztywność i nośność znacznie większą od taśmy wyjściowej.

Stosowanie kształtowników profilowanych na zimno wymaga jednak odmiennego podejścia do projektowania, wytwarzania i montażu. Przedstawiono je w PN-EN 1993-1-3:2008. Tam też poda-



Rys. 4. Przykłady kształtowników giętych na zimno



Rys. 5. Przykłady profilowanych na zimno blach fałdowych (a, b, c), kaset ściennych (d) oraz płyt elewacyjnych (e)

no parametry wytrzymałościowe stali stosowanych na kształtowniki profilowane na zimno. Powinny być one podatne na obróbkę plastyczną na zimno i ewentualne cynkowanie. Materiał wyjściowy musi mieć wydłużalność co najmniej 15%. Wymaganie to spełniają stale podane w PN-EN 1993-1-3:2008, z wyjątkiem stali S460MC, S500MC i S550MC.

W PN-EN 1993-1-4:2007 podano charakterystyki wytrzymałościowe stali nierdzewnych, a w PN-EN 1993-1-12:2009 parametry wytrzymałościowe stali konstrukcyjnej wyrobów walcowanych: S500, S550, S620 i S690 oraz blach walcowanych na gorąco S500, S550, S600 i S650 i S700.

Parametry gatunków wyrobów stalowych zalecanych przez PN-EN 1993-1-1 są zawarte w normach hutniczych [1] ÷ [8]. Do obliczeń wytrzymałościowych jako wartości charakterystyczne zaleca się przyjmować wartości nominalne stali konstrukcyjnych podane w PN-EN 1993-1-1 lub bezpośrednio z normy wyrobu, takie jak: granicę plastyczności $f_y = R_{eH}$ i wytrzymałość na rozciąganie $f_u = R_m$. Nominalne wartości granicy plastyczności f_y i wytrzymałości na rozciąganie f_u stali konstrukcyjnych walcowanych na gorąco wg PN-EN 1993-1-1 podano w tabeli. Zgodnie z PN-EN 1993-1-1 moduł sprężystości podłużnej stali należy przyjmować $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$, moduł sprężystości poprzecznej stali $G = 81\,000 \text{ N/mm}^2$ oraz współczynnik Poissona $\nu = 0,3$.

W europejskich normach hutniczych stosuje się oznaczanie gatunków stali m.in. za pomocą symboli literowo-cyfrowych. Taki sposób oznakowania stali zastosowano w PN-EN 1993-1-1 (tabela). Wskazuje on na zastosowanie oraz cechy mechaniczno-plastyczne stali i jest najbardziej przydatny konstruktorowi. Schemat oznaczania stali wg europejskich norm hutniczych przedstawiono na rysunku 6.

Na początku znakowania znajduje się duża litera alfabetu łacińskiego wskazująca na zastosowanie stali: S – stal konstrukcyjna. Drugi symbol główny to trzy-cyfrowa liczba, określająca minimalną granicę plastyczności stali f_y [MPa] dla najmniejszego zakresu grubości wyrobu $t \leq 16 \text{ mm}$. W przypadku stali stopowych ulepszonych cieplnie zakres ten wynosi $t \leq 50 \text{ mm}$. Spośród gatunków stali konstrukcyjnych ogólnego przeznaczenia (blachy, pręty, kształtowniki) produkowa-

Nominalne wartości granicy plastyczności f_y i wytrzymałości na rozciąganie f_u (wg PN-EN 1993-1-1) w przypadku stali konstrukcyjnej walcowanej na gorąco

Norma i gatunek stali	$f_y = \min R_{eH}$ w przypadku grubości t [mm]		$f_u = \min R_m$ w przypadku grubości t [mm]	
	$t \leq 40$	$40 < t \leq 80$	$t \leq 40$	$40 < t \leq 80$
PN-EN 10025-2				
S235 JR/J0/J2	235	215	360	360
S275 JR/J0/J2	275	255	430	410
S355 JR/J0/J2/K2	355	335	510	470
S450 J0 *	440	410	550	550
PN-EN 10025-3				
S275 N/NL	275	255	390	370
S355 N/NL	355	335	490	470
S420 N/NL	420	390	520	520
S460 N/NL	460	430	540	540
PN-EN 10025-4				
S275 M/ML	275	255	370	360
S355 M/ML	355	335	470	450
S420 M/ML	420	390	520	500
S460 M/ML	460	430	540	530
PN-EN 19925-5				
S235 J0W/J2W	235	215	360	340
S355 J0W/J2W/K2W	355	335	510	490
PN-EN 10025-6				
S460 Q/QL/QL1	460	440	570	550
PN-EN 10210-1				
S235 JRH*)	235	215	360	340
S275 J0H/J2H	275	255	430	410
S355 J0H/J2H/K2H	355	335	510	490
S275 NH/NLH	275	255	390	370
S355 NH/NLH	355	335	490	470
S420 NH/NLH	420	390	540	520
S460 NH/NLH	460	530	550	550
PN-EN 10219-1				
S235 JRH *)	235		360	
S275 J0H/J2H	275		430	
S355 J0H/J2H/K2H	355		510	
S275 NH/NLH	275		370	
S355 NH/NLH	355		470	
S460 NH/NLH	460		550	
S275 MH/MLH	275		360	
S355 MH/MLH	355		470	
S420 MH/MLH	420		500	
S460 MH/MLH	460		530	

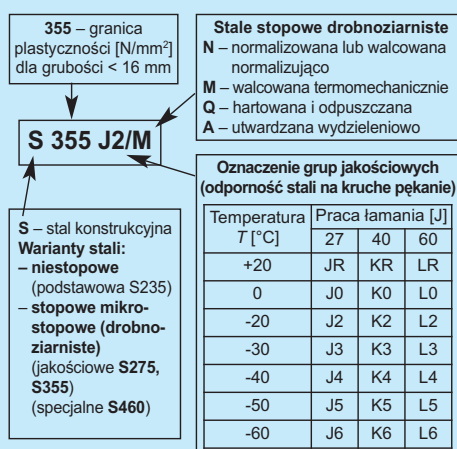
*) Dana stal jest produkowana tylko w jednej odmianie plastyczności

ne są stale: S235; S275; S355; S420; S450; S460.

Pierwszy symbol dodatkowy stali niestopowych to odmiana ich plastyczności. Jest ona wyrażana pracą łamania KV (uśrednioną) w żądanej temperaturze (gdyż cechy mechaniczne stali silnie zależą od temperatury). W symbolu odmiany plastyczności jest zakodowany poziom pracy łamania KV [J]

próbek udarnościowych z karbem ostrym Charpy V oraz temperatura badań udarności T [°C]. Oznaczenie odmian plastyczności stali (grup jakościowych) wg PN-EN 10025 podano na rysunku 6.

Spośród gatunków stali niestopowych konstrukcyjnych S235 można np. stosować następujące: S235JR, S235JRG1, S235JRG2, S235J0, S235J2G3, S235J2G4.



Rys. 6. Schemat oznaczania stali wg europejskich norm hutniczych

Pierwszy symbol dodatkowy stali stopowej drobnziarnistej składa się z litery określającej stan dostawy i może to być litera:

N – stal normalizowana lub walcowana normalizująco;

M – stal walcowana termomechanicznie;

Q – stal hartowana i odpuszczana;

A – stal utwardzana wydzieleniowo;

H – stal na kształtowniki drążone;

L – stal do stosowania w niskich temperaturach.

Zgodnie z PN-EN 1993-1-1, w celu określenia nośności (przekroju, elementu) korzysta się z wartości granicy plastyczności stali f_y lub wytrzymałości stali na rozciąganie f_u (tabela), którą w zależności analizowanego stanu wyężenia elementu (przekroju) dzieli się przez odpowiedni, „jawnie” występujący w obliczeniach, współczynnik bezpieczeństwa nośności γ_{Mi} . W ocenie nośności przyjmuje się wytrzymałość obliczeniową stali f_d , którą wyznacza się ze wzoru

$$f_d = \frac{f_y}{\gamma_{Mi}} \quad (1)$$

gdzie:

f_y – granica plastyczności stali;

γ_{Mi} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa nośności, który przyjmuje się zgodnie z analizowanym stanem wyężenia: $\gamma_{Mi} = \gamma_{M0}, \gamma_{M1}, \gamma_{M2}, \gamma_{M3}$ – (odpowiednik materiałowego współczynnika bezpieczeństwa γ_s w PN-90/B-03200).

Należy zwrócić uwagę, że materiałowy współczynnik bezpieczeństwa γ_s nie występuje w obliczeniach wg normy PN-90/B-03200 w sposób „jawnie”, gdyż ustalając nośność, korzysta się bezpośrednio z wytrzymałości obliczeniowej stali f_d . Parametry wytrzymałościowe staliowych wyrobów walcowanych zależą od grubości ich ścianek. Im grubszy jest wy-

rób hutniczy, tym większa jest niejednorodność jego struktury w kierunku grubości, gdyż ze wzrostem grubości maleje stopień zgniotu ziarn w środku grubości wyrobu. W PN-EN 1993-1-1 przyjęto 2 przedziały zmian granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie stali: $t \leq 40$ mm oraz $40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm (gdzie t – grubość ścianki wyrobu). W PN-90/B-03200 np. w przypadku stali St3 przyjęto 3 przedziały tych zmian: $t \leq 16$ mm, $16 \text{ mm} < t \leq 40$ mm i $40 \text{ mm} < t \leq 100$ mm.

Zgodnie z PN-EN 1993-1-1 stal stosowana na konstrukcje budowlane powinna być **ciągliwa, spawalna i odporna na kruche pękanie**.

Warunki ciągliwości należy określać za pomocą parametrów:

- stosunek wytrzymałości na rozciąganie f_u do granicy plastyczności f_y nie powinien spełniać warunku $f_u/f_y = 1,10$;
- odkształcenie całkowite A_5 przy zerwaniu próbki pięciokrotnej nie może być mniejsze od 15%;
- stosunek odkształceń granicznych ε_u (odpowiadających wytrzymałości stali na rozciąganie f_u) do odkształceń przy osiągnięciu granicy plastyczności $\varepsilon_y = f_y/E$ (gdzie E – moduł sprężystości podłużnej stali) nie może być mniejszy niż 15.

Wymagania spełniają stale S235, S275, S355, S420 oraz S460 (gatunki stali wymienione w tabeli).

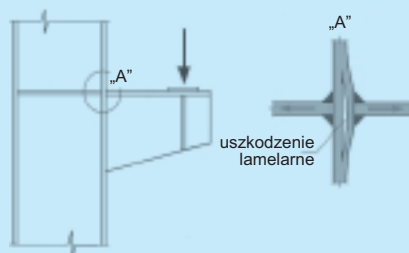
Kruche pękanie jest formą zniszczenia konstrukcji stalowej, która występuje bez widocznych makroskopowych odkształceń. Niebezpieczeństwo pojawienia się tego zjawiska wzrasta ze zwiększeniem się spiętrzenia naprężeń (szczególnie w układzie wieloosiowego stanu naprężenia), z grubością wyrobu stalowego oraz spadkiem temperatury. Aby uniknąć kruchego pęknięcia elementów rozciąganych, przy najniższej temperaturze eksploatacyjnej w projektowanym okresie użytkowania obiektu, wymagane jest, by stal wykazywała wystarczającą udarność, której miarą jest praca łamania KV [J].

PN-EN 1993-1-10 określa dopuszczalną grubość elementów wykonanych z danej grupy stali ze względu na kruche pękanie, stosownie do takich warunków eksploatacji i parametrów, jak:

- właściwości stali (granica plastyczności f_y i minimalna praca łamania KV w określonej temperaturze);
- charakterystyka wyrobu (kształt, koncentracja naprężeń, grubość);

■ sytuacje i parametry obliczeniowe (np. najniższa temperatura, szybkość przyrostu obciążenia).

Nowym, w stosunku do PN-90/B-03200, wymaganiem w PN-EN 1993-1-1 jest ciągliwość międzywarstwowa z uwagi na pęknięcia lamelarne (rysunek 7). Ciągliwość międzywarstwowa jest to zdolność do odkształceń plastycznych na wskroś grubości materiału, np. w spawanych połączeniach belek ze słupami. Jeśli w konstrukcji występuje szczególnie przypadek obciążenia złożonego, gdy ścianka elementu będzie obciążona w kierunku prostopadłym w złączy teowym lub krzyżowym, to materiał musi dodatkowo spełniać warunek ciągliwości międzywarstwowej. Należy ją obliczyć w zależności od spodziewanych sił skurczowych w kierunku grubości blachy, które mogą spowodować pęknięcie laminarne. Wytyczne obliczeń i doboru parametrów ciągliwości podano PN-EN 1993-1-10:2007. Jeśli zgodnie z PN-EN 1993-1-1 wymagana jest stal o ulepszonej ciągliwości międzywarstwowej, to wówczas należy stosować stal wg PN-EN 101164:2005.



Rys. 7. Przykład lamelnego pęknięcia pasa słupa wywołanego niedostateczną wytrzymałością międzywarstwową stali

Wymagania dotyczące środków złącznych (śrub, elektrod), a także obliczania połączeń śrubowych i połączeń spawanych oraz ocena nośności styków znajdują się w PN-EN 1993-1-8:2006. W przypadku śrubowych połączeń sprężających należy stosować śruby wysokiej wytrzymałości wg [9] ÷ [15].

W projektowaniu konstrukcji w aspekcie jej trwałości należy brać pod uwagę następujące procesy deterioracji (pogarszanie się właściwości fizycznych materiałów i stanu technicznego konstrukcji podczas jej eksploatacji):

- korozję wskutek oddziaływań (wpływów) środowiska;
- zużycie części wskutek oddziaływań mechanicznych;
- zmęczenie materiału (rozwój mikro-pęknięć wskutek oddziaływań wysokocyklowych ($N > 10^4$ cykli)).

Nośność zmęczeniową konstrukcji sprawdza się wg PN-EN-1993-1-9:2007.

Literatura

- [1] PN-EN 10025-1:2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 1. Ogólne warunki techniczne dostawy.
- [2] PN-EN 10025-2:2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 2. Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.
- [3] PN-EN 10025-3:2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 3. Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych spawalnych po normalizowaniu lub walcowaniu normalizacyjnym.
- [4] PN-EN 10025-4:2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 4. Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych spawalnych po walcowaniu termomechanicznym.
- [5] PN-EN 10025-5:2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 5. Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych trudno rdzewiejących.
- [6] PN-EN 10025-6:2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 6. Warunki techniczne dostawy wyrobów płaskich o podwyższonej granicy plastyczności. W stanie ulepszonym cieplnie.
- [7] PN-EN 10210-1:2006. Kształtowniki zamknięte wykonane na gorąco ze stali konstrukcyjnych niestopowych i drobnoziarnistych – Techniczne warunki dostawy.
- [8] PN-EN 10219-1:2006. Kształtowniki zamknięte ze szwem wykonane na zimno ze stali konstrukcyjnych niestopowych i drobnoziarnistych – Techniczne warunki dostawy.
- [9] PN-EN 14399-1:2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 1: Wymagania ogólne.
- [10] PN-EN 14399-2:2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 2: Badania przydatności do połączeń sprężanych.
- [11] PN-EN 14399-3:2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 3: System HR. Zestawy śruby z łbem i nakrętki sześciokątnej.
- [12] PN-EN 14399-4:2007 Część 4: System HV. Zestawy śruby z łbem i nakrętki sześciokątnej.
- [13] PN-EN 14399-5:2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 5: Podkładki okrągłe.
- [14] PN-EN 14399-6:2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 6: Podkładki okrągłe ze ścięciem.
- [15] PN-EN ISO 5817:2007 (U) Spawanie – Złącza spawane ze stali niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) – Poziomy jakości według niezgodności spawania.

Prof. dr hab. inż. Antoni Biegus
Politechnika Wroclawska