

KONSTRUKCIJA NEBOTIČNIKA LAKHTA CENTER V SANKT PETERBURGU, RUSIJA

STRUCTURE OF THE SKYSCRAPER LAKHTA CENTER IN SAINT-PETERSBURG, RUSSIA

dr. Alexey Shakhvorostov, inženjer stroitelj

a.shakhvorostov@inforceproject.ru

Inforsprojekt, d. o. o.,

Vurnikova 2, 1000 Ljubljana

Strokovni članek

UDK 624.014.2:69.032.22(470+571)

Povzetek | Članek opisuje konstrukcijo najvišje stolpnice v Evropi, nebotičnika Lakhta Center, višine 462 metrov. V tej stolpnici so poslovni prostori sedeža ruske družbe Gazprom. Začeli so jo graditi oktobra 2012, dokončana pa je bila leta 2018.

Ključne besede: nebotičnik, armiranobetonske konstrukcije, jeklene konstrukcije, sovprežne konstrukcije iz jekla in betona.

Summary | The paper describes the structures of the highest building in Europe – 462 meter high skyscraper Lakhta Center. The building is the headquarters of the company Gazprom. The Lakhta Center construction began in October 2012 and finished in 2018.

Key words: reinforced concrete structures, steel structures, composite steel and concrete structures.

1 • UVOD

1.1 Opis objekta

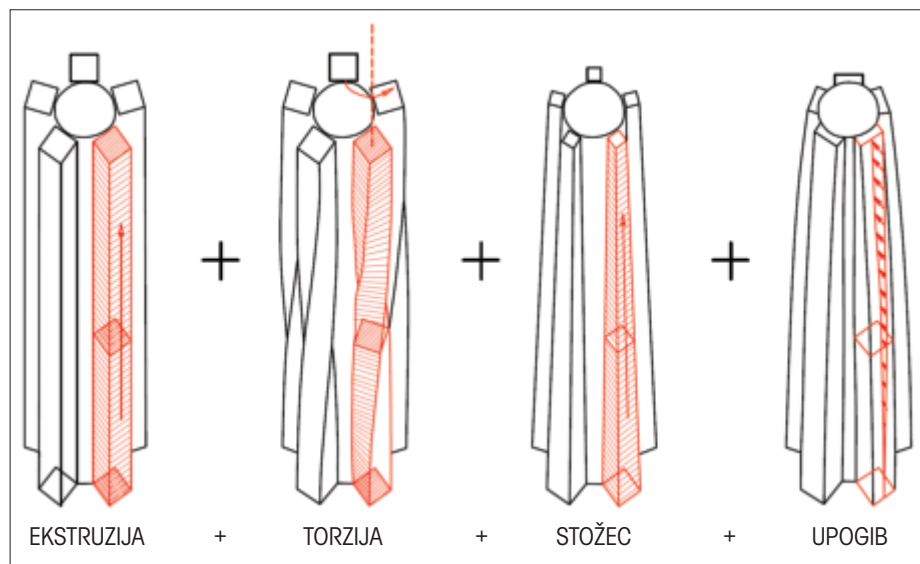
Nebotičnik Lakhta Center je predviden za glavni sedež ruske družbe Gazprom, največjega proizvajalca zemeljskega plina. Zgradba, visoka 462 m, je v mestu Sankt Peterburg neposredno ob Finskem zalivu in je najvišja v Evropi. Lakhta Center ima 86 nadzemnih in 3 podzemne etaže. Na nivoju zgornje, 86. etaže je razgledna ploščad. Na vsakih 16 etaž sta predvideni po dve tehnični etaži, kjer so poleg instalacijske opreme montirane sovprežne prečne ojačitve konstrukcije (angl. outriggers), ki izboljšajo togost celotne zgradbe. Zato se te tehnične etaže imenujejo tudi »outrigger« etaže. Skupaj so v stolpnici štiri »outrigger« nivoji, ki so na 17. in 18., 33. in 34., 49. in 50. ter 65. in 66. »outrigger« (tehnični) etaži. V preostalih etažah so poslovni pro-stori družbe Gazprom.

Geometrijo stolpnice kaže slika 1. Deli stolpnice se sukajo okrog središča v konični vrh. Medetažne plošče imajo obliko petih kvadratnih cvetnih lističev, ki

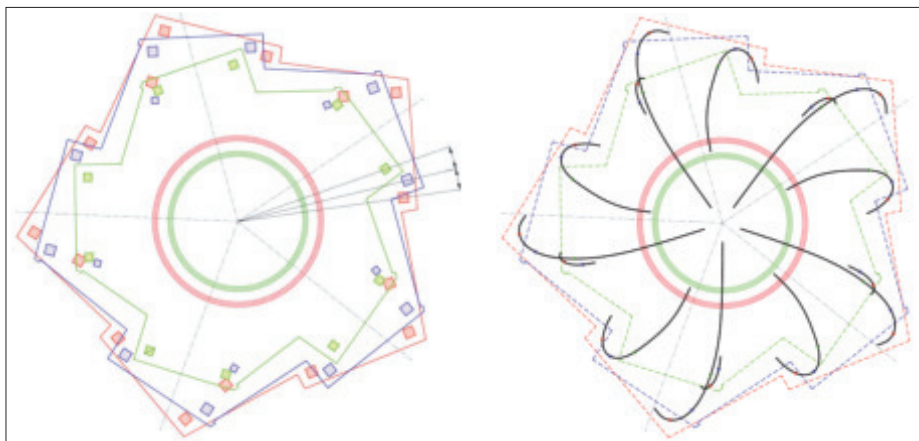
jih povezuje okroglo osrednje jedro. Z naraščanjem višine se »lističi« vrtijo okrog svoje osi v nasprotni smeri urnega kazalca. Poleg tega z naraščanjem višine ti

»lističi« postanejo manjši, njihovo središče pa se premika proti osi okroglega jedra stavbe.

Na nivoju 1. etaže je nadzemni del stolpnice umeščen v peterokotnik z dolžino stranice 35,2 m med osmi stebrov. Od 1. do 16. etaže se gabariti vsake naslednje



Slika 1 • Geometrijska shema stolpnice.



Slika 2 • Tlorisna dispozicija 19., 39. in 59. etaže.

etaže nadzemnega dela povečujejo, od 16. etaže navzgor pa se zmanjšujejo (slika 2).

1.2 Zgodovina projekta

Zgodovina projekta sega v konec leta 2006, ko je britanski arhitekturni biro RMJM London Limited zmagal na arhitekturnem natečaju za projektiranje nebotičnika glavnega sedeža družbe Gazprom v

urbanem okolju mesta Sankt Peterburg blizu zgodovinskega središča. Leta 2008 je konstruktorski biro Inforceproject zmagal na natečaju za projektiranje gradbenih konstrukcij stolpnice, ki se je takrat imenovala Okhta Center (slika 3). Leta 2011 je bil projekt nebotičnika, ki je bil takrat že v veliki meri pripravljen, preklican zaradi ostrih kritik javnosti mesta Sankt Peters-

burg zaradi neskladnosti z arhitekturo zgodovinskega središča mesta. V istem letu (2011) so začeli izdelovati projektno dokumentacijo za stolpnico za novi lokaciji, na obali Finskega zaliva Baltskega morja. Kompleks je bil imenovan Lakhta Center (slika 4). Čeprav se je vizualno stolpnica le zanemarljivo spremenila, so se njeni tlorisni gabariti povečali za 10 %, višina pa se je povečala za 66 metrov, s 396 m na 462 m (slika 5). Zadnja pomembna sprememba projekta nebotičnika Lakhta Center je bila v obdobju 2014–2015, ko je naročnik v imenu hčerinske družbe Gazprom povabil k sodelovanju pri projektu družbo Samsung C&T.



Slika 3 • Prikaz kompleksa Okhta Center.



Slika 4 • Prikaz kompleksa Lakhta Center.



Slika 5 • Lokaciji stolpnice Okhta Centra in Lakhta Centra na zemljevidu Sankt Peterburga.

1.3 Udeleženci projekta

Objekt:

Lakhta Center, Sankt Peterburg

Investitor:

Gazprom

Arhitektura:

RMJM, Gorproject

Konstrukcija:

Inforceproject, Gorproject

Projektno vodenje:

AECOM, SamsungC&T

Glavni izvajalec:

Renaissance Construction



Slika 6 • Udeleženci projekta na gradbišču Lakhta Center.

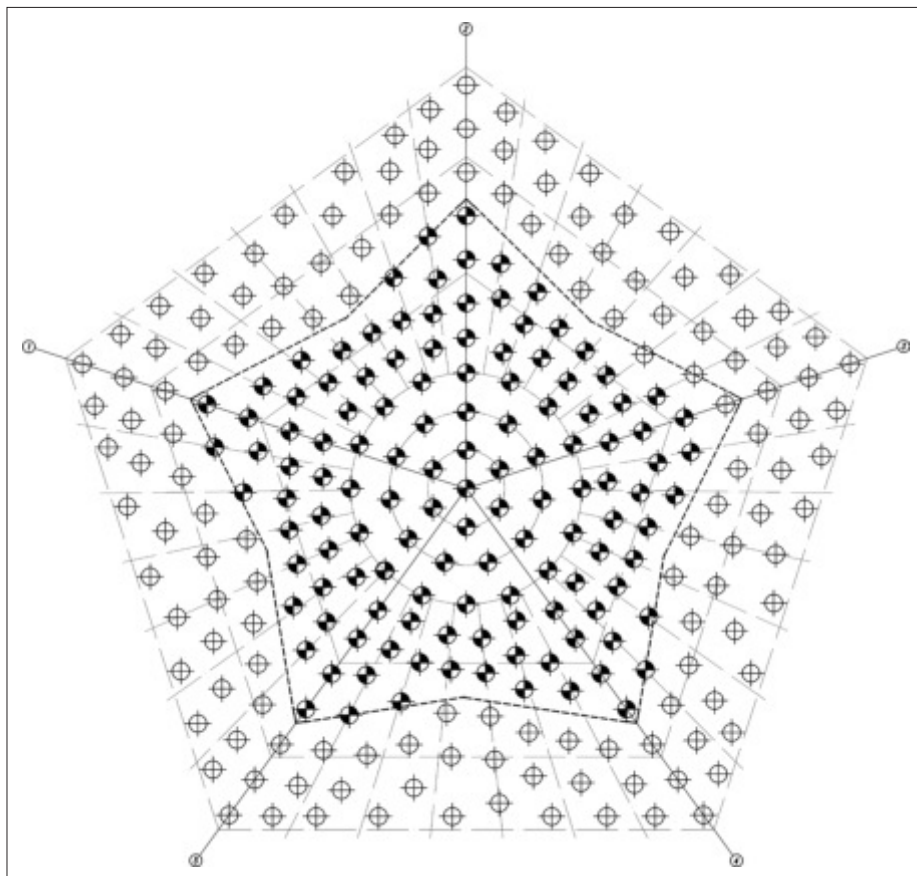
2 • KONSTRUKCIJA NEBOTIČNIKA LAKHTA CENTER

2.1 Konstrukcija temeljev

Projekt nebotičnika Lakhta Center je od projektantov zahteval rešitve številnih zapletenih inženirskih nalog. Ena od njih je bila projektiranje konstrukcije temeljev (Shakhvorostov, 2016). Značilnost gradbene parcele Lakhta Center je

bila prisotnost glinastih tal z nizko nosilnostjo, debelina plasti teh glinastih tal pa je znašala ca. 20 m. Šele na globini, večji od 20 m, se je pričnela trda glina, ki je bila uporabljena kot nosilna osnova za stolpnico, skalnata tla iz peščenjakov pa so se pričnela na globini približno 100 m.

Temeljenje s piloti obsega 264 uvrtnih pilotov premera 2000 mm ter dolžine 55 m in 65 m, postavljenih v medsebojnem razmiku 4 do 6 metrov oziroma od 2 do 3 premere pilotov (slika 7). Ker se je vrtanje vrtin za uvrtno pilote pričelo na površini terena, ne pa z dna gradbene jame, je dejanska globina vrtin za namestitvev pilotov znašala 72 m in 82 m (slika 8). Ocenjena nosilnost pilotov dolžine 55 metrov je znašala 36.000 kN v skladu s



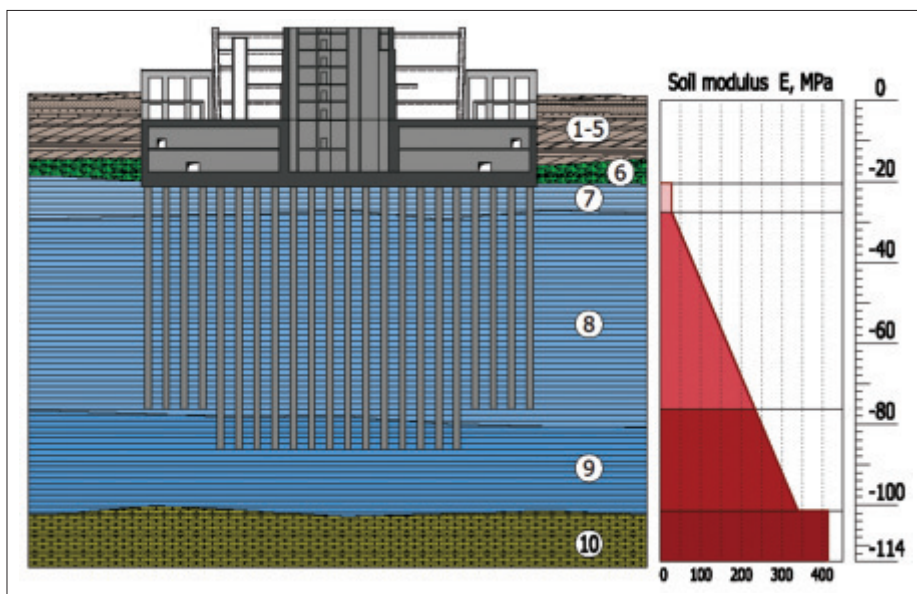
● Piloti dolžine 65 metrov, merjeno od dna gradbene jame

○ Piloti dolžine 55 metrov, merjeno od dna gradbene jame

Slika 7 • Shema namestitve pilotov stolpnice Lakhta Center.

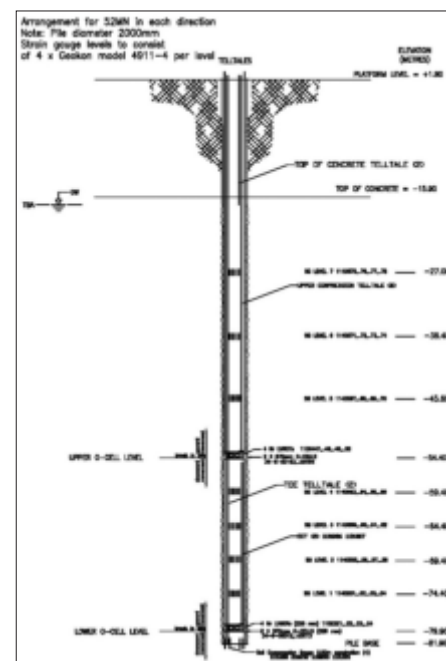
standardi in 64.000 kN po rezultatih preizkusa z metodo O-cell (angl. Osterberg Cell test), ocenjena nosilnost pilotov dolžine 65 metrov

pa 43.000 kN v skladu s standardi in 77.000 kN po rezultatih preizkusa z metodo O-cell (slike 9 do 11).



Slika 8 • Prerez pilotnega temelja stolpnice Lakhta Center.

Teža stolpnice pri karakterističnih obtežbah (unfactored load) znaša 4.930.000 kN vključno s škatlstim temeljem. Pretežni del teh obtežb (ca. 70 %) je deloval na majhen del tlorisa premera 26 m oziroma 530 m², ki je omejen z okroglim osrednjim jedrom stolpnice. V tem delu je tlak pod spodnjim delom temelja znašal 6500 kPa. Ker ni bilo mogoče prenesti tako velike obtežbe neposredno na temeljna tla, je bilo treba porazdeliti ta tlak po obrobju stolpnice. Prvotni izračuni za določitev potrebne debeline temeljne plošče (brez škatlastega temelja) so pokazali, da z vidika enakomernosti posadanja običajna temeljna plošča, celo debeline 7–8 m, ne zadostuje. Posedki pod jedrom stolpnice so znašali ca. 180 mm, po obodu stolpnice pa ca. 60 mm. Prvi korak pri reševanju tega problema je bil prenos obtežb z osrednjega dela na obrobje stolpnice s pomočjo povezovalnih togostnih diafragm. Drugi logični korak je bila zgornja



Slika 9 • Prerez testa Osterberg Cell.

plošča, ki je povezala celotni sistem v enotni škatlsti temelj in zagotovila bolj ekonomično rešitev. Izračuni so pokazali, da ima tak temelj večjo togost (razlika med posedki v coni jedra in po obrobju stolpnice ne presega 25–30 mm) ter uspešno razbremeno jedro stolpnice premera 26 m, tako da prenese in enakomerno porazdeli obremenitve z jedra na enakostranični peterokotnik podzemnega dela stolpnice (dolžina stranice 57,5 m). Po izvedbi vseh ukrepov je povprečni tlak pod temeljem stolpnice pri normativnih obtežbah znašal 870 kPa.



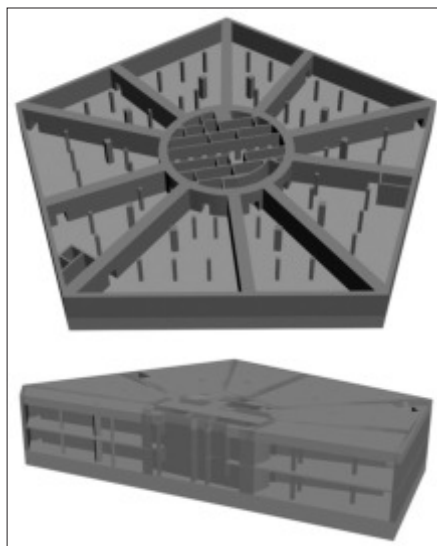
Slika 10 • Testni pilot Osterberg Cell.



Slika 11 • Test dvigalke Osterberg Cell.

Končno je bil za projekt nebotičnika Lakhta Center potrjen škatlasti temelj (slika 12). Spodnja temeljna plošča, ki je na relativni koti -17,650 m, ima debelino 3600 mm, zgornja temeljna plošča, ki je na relativni koti -4,650 m, pa ima debelino 2000 mm. Skupno delovanje spodnje in zgornje plošče škatlastega temelja zagotavlja 10 povezovalnih togostnih diafragm debeline 2500 mm, ki potekajo od jedra stolpnice v radialni smeri. V škatlastem temelju je bil uporabljen beton razreda C50/60 z dodatnimi zahtevami za vodoneprepustnost, krčenje in sproščanje hidracijske toplote.

Zapletena vprašanja so se pojavljala tudi pri gradnji škatlastega temelja. Zaradi visokih napetosti, peterokotne oblike temelja in drugih značilnosti stolpnice je bilo potrebno neprekinjeno betoniranje spodnje plošče debeline 3600 mm za škatlasti temelj v količini skoraj



Slika 12 • Konstrukcija škatlastega temelja stolpnice, 3D-pogled.

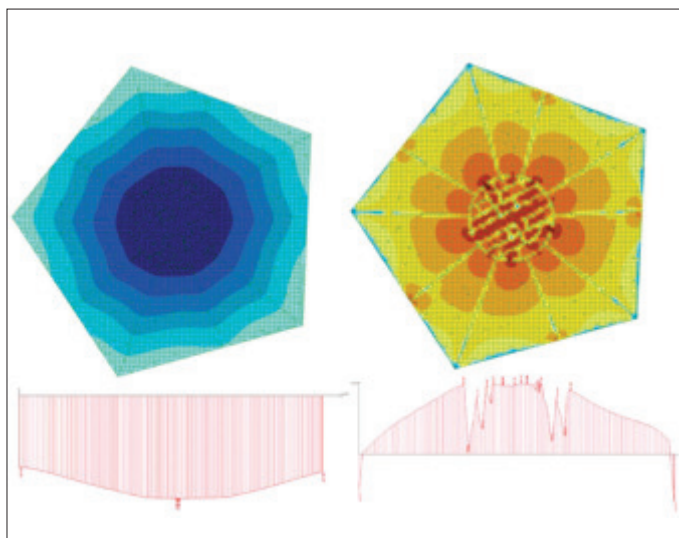
20.000 m³ betona, kar je bil takrat svetovni rekord, ki je bil vpisan v Guinnessovo knjigo rekordov. V sredini avgusta 2015 je bila gradnja škatlastega temelja zaključena.

Na slikah 13 do 17 so prikazani upogibki in napetosti škatlastega temelja.

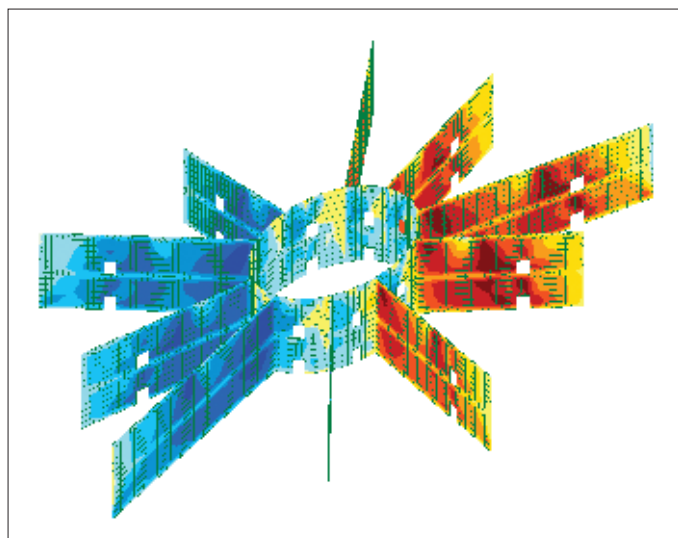
2.2 Konstrukcija nadzemnega dela stolpnice

Glavno nosilno konstrukcijo stolpnice tvori osrednje armiranobetonsko jedro skupaj z 10 sovprežnimi stebri po obodu stolpnice. Za zmanjševanje razpona med stebri je predvidenih še 5 sovprežnih stebrov do nivoja 56. etaže. Dodatno togost zgradbe in odpornost pred progresivno porušitvijo zagotavljajo dvoetažne prečne ojačitve konstrukcije (*angl. outriggers*) na vsakih 16 etaž po višini zgradbe (slika 18).

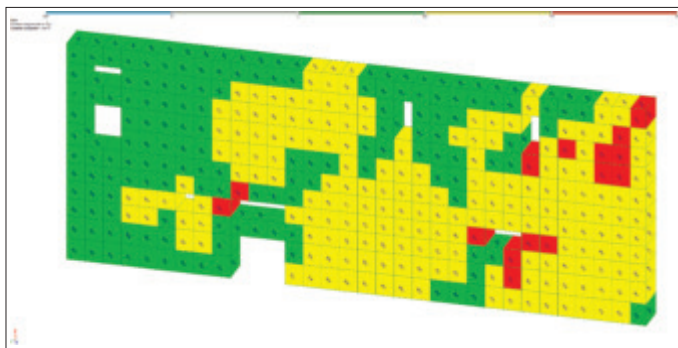
Geometrija konstrukcije nebotičnika je zvita okoli navpične osi. Trenutno je na svetu deset



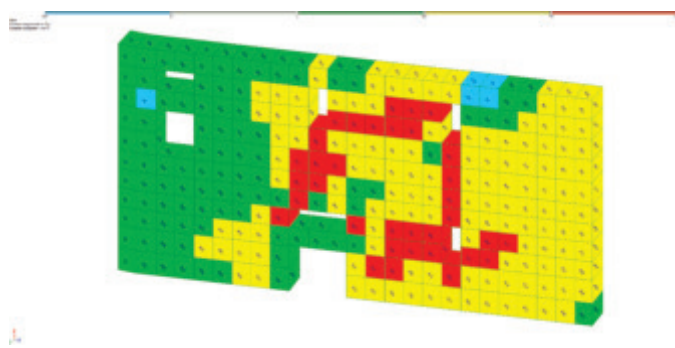
Slika 13 • Upogibki in natezne napetosti v spodnji plošči škatlastega temelja.



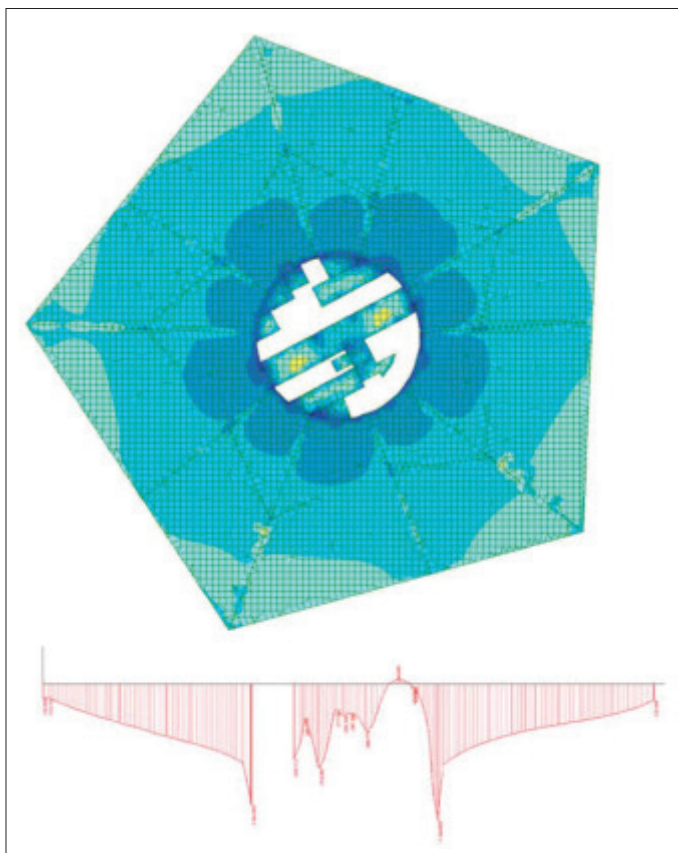
Slika 14 • Strižne napetosti v radialnih stenah škatlastega temelja.



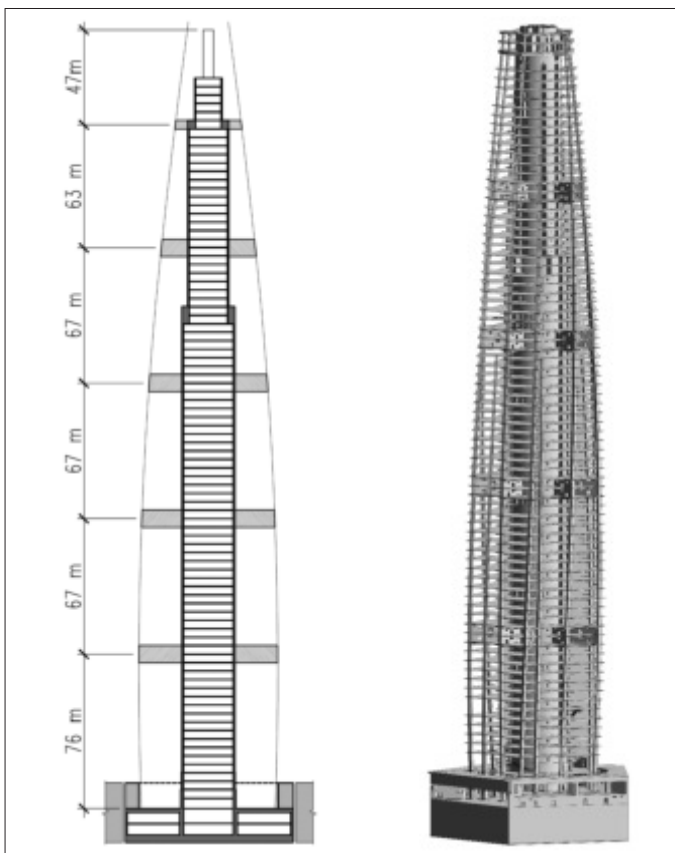
Slika 15 • Strižne napetosti v daljši radialni steni škaflastega temelja (končni 3D-elementi).



Slika 16 • Strižne napetosti v krajši radialni steni škaflastega temelja (končni 3D-elementi).



Slika 17 • Tlačne napetosti v zgornji plošči škaflastega temelja.



Slika 18 • Shema razporeditve prečnih ojačitve in 3D-pogled konstrukcije stolpnice Lakhta Center.

stavb s tako konstrukcijo, višjih od dvesto metrov (slika 19) (CTBUH, 2019).

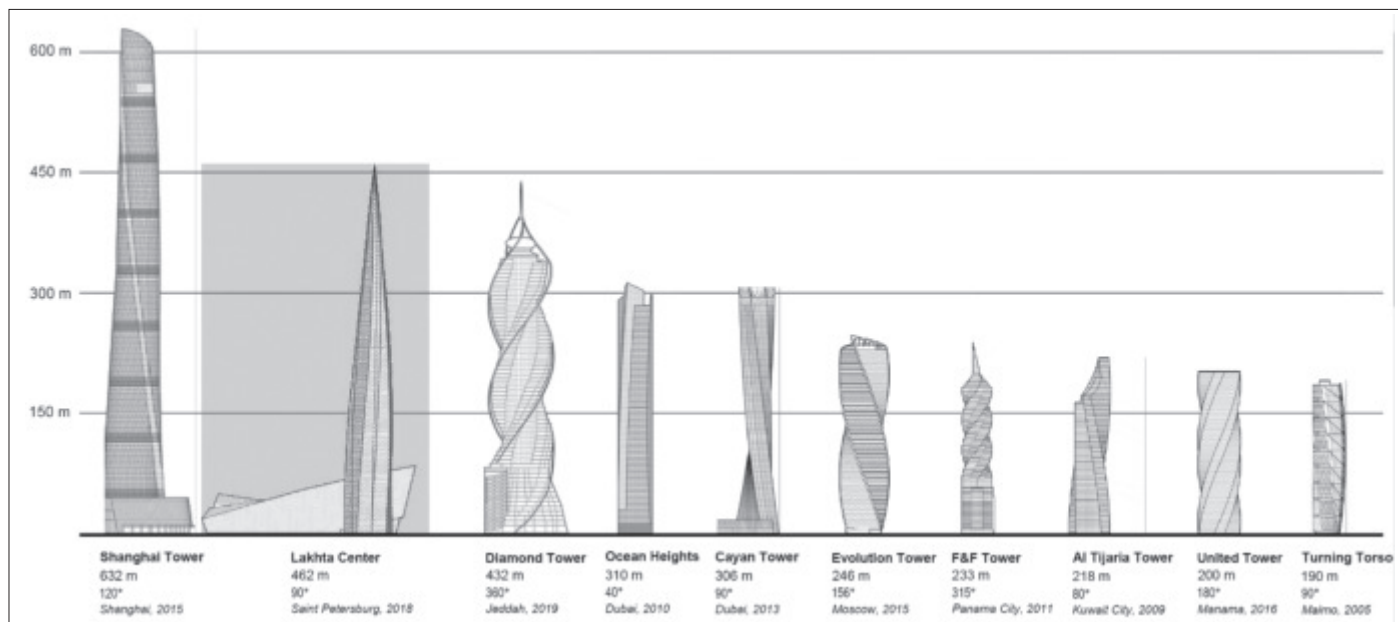
Najvišja med njimi je Shanghai Tower. Toda zvito obliko ima le fasada te stavbe, nosilna konstrukcija pa ne. Lakhta Center je tako najvišja stavba, pri kateri je zvita ne le fasada, ampak tudi konstrukcija.

Zvitost konstrukcije je konstantna po višini, in oblika stavbe je zato spiralna. Stebri na obodu stavbe so nagnjeni v radialni in tangencialni smeri (slika 20). Zaradi tega nastanejo vodoravne sile, ki se prenašajo na jedro preko medetažnih plošč. Za prevzem torzijske obre-

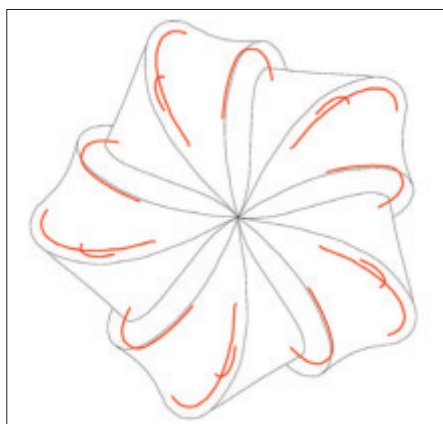
menitve je bila izbrana okrogla oblika preseka jedra nebotičnika. Takšna rešitev v največji meri izpolnjuje zahteve za to vrsto sile, saj je okrogla oblika preseka jedra najbolj učinkovita za torzijo.

Značilnost konstrukcije so tudi prečne ojačitve konstrukcije (angl. outrigger structures). Nosilno konstrukcijo nebotičnika tvori osrednje armiranobetonsko jedro skupaj s sovprežnimi stebri in nosilci. Togost in stabilnost konstrukcije sta zagotovljeni z osrednjim jedrom in 10 sovprežnimi stebri, ki so razporejeni po obodu stolpnice. Na nivojih 17.–18., 33.–34.,

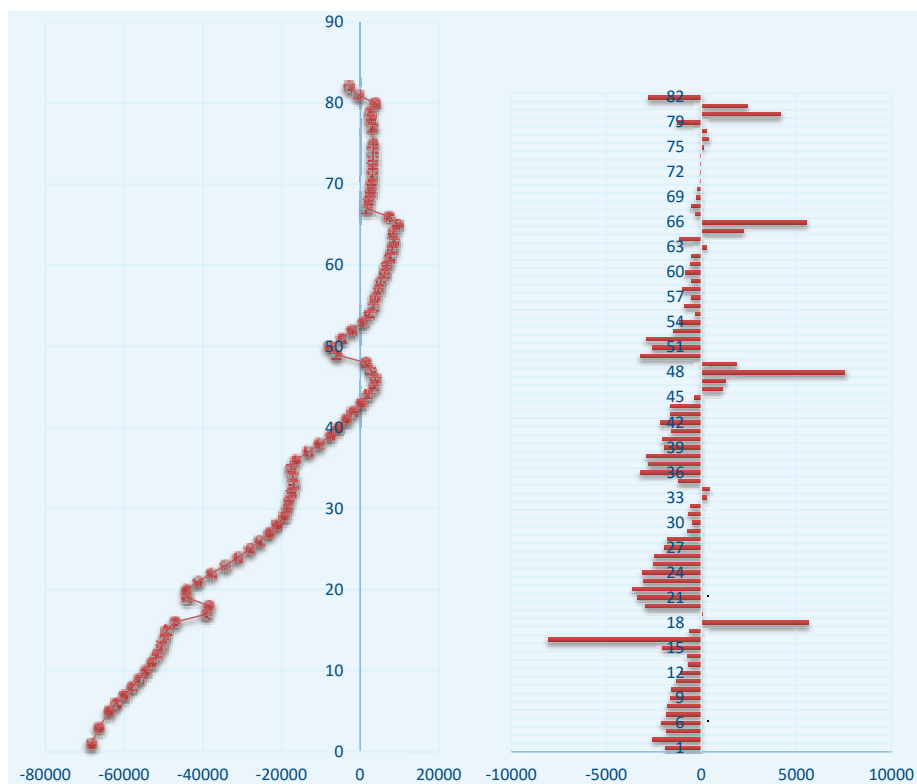
49.–50., 65.–66. etaže je armiranobetonsko jedro povezano s stebri s prečnimi ojačitvami. Vse našteje etaže so tehnične etaže. Medetažna plošča nad 80. etažo igra tudi vlogo zgornje prečne ojačitve konstrukcije stolpnice. Osrednje armiranobetonsko jedro je osnovni element, ki zagotavlja prevzem horizontalnih obtežb. Toda zaradi razmerja med premerom jedra in višino stolpnice, ki znaša 1 : 17, togost jedra ni zadoščala normativnim zahtevam za horizontalne pomike vrha stavbe in največji dovoljeni pospešek zgornjih etaž, ki je bil pogoj za udobno bi-



Slika 19 • Najvišje zvite stavbe na svetu.



Slika 20 • Tloris osi stebrov, ki so nagnjeni v radialni in tangencialni smeri.



Slika 21 • Torzijski moment v jedru (v 10 kNm) in torzijski momenti po etažah (v 10 kNm).

vanje v zgornjih etažah. Za to vrsto ojačitev so se konstruktorji odločili po temeljitem razmisleku (slika 22).

Izvedba konstrukcije s prečnimi ojačitvami je omogočila zmanjšati horizontalne pomike vrha nebotičnika, ki jih povzroča obtežba vetra, in tako zagotoviti udobno bivanje v zgornjih etažah stolpnice.

Razlika med pomiki konstrukcije v primeru polne obtežbe vetra je zelo velika. Za konstrukcijo brez prečnikov znaša 521 mm, s prečniki na petih nivojih pa 313 mm (slika 23). Pomik je bil izračunan v 81. etaži.

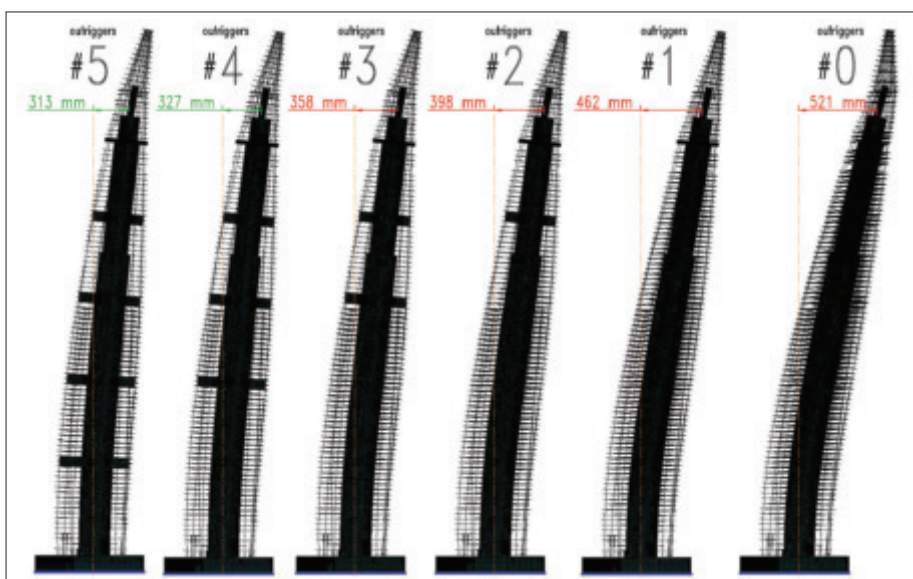
Za kriterij udobja bivanja v zgornjih etažah je bila uporabljena omejitev vodoravnega pospeška. Naročnik je predpisal, da ne sme

preseči 0,08 m/sec². Brez prečnikov tega pogoja ni bilo mogoče izpolniti. S prečniki pa je vrednost pospeškov 0,049 m/sec².

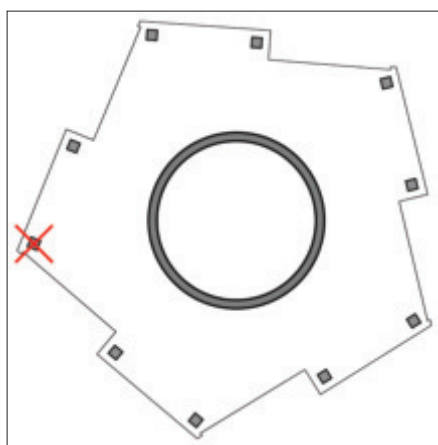
Naročnik projekta Lakhta Tower je postavil tudi zahtevo, da mora imeti konstrukcija visok nivo robustnosti in veliko odpornost proti progresivni porušitvi. Tudi temu pogoju je bilo ustrezno z uporabo prečnikov na 5 nivojih.



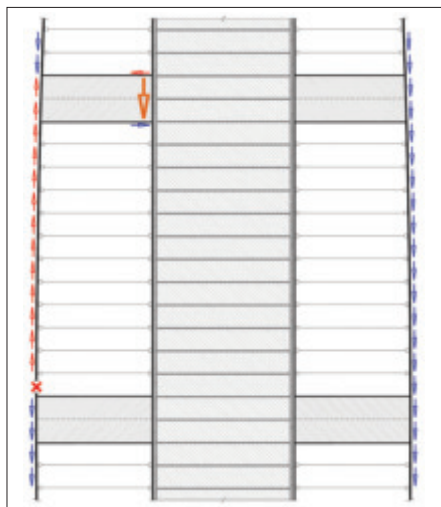
Slika 22 • Inženirji konstruktorji, avtorji projekta nebotičnika Lakhta Tower, med razpravo o ojačitvi konstrukcije s prečniki. Z leve proti desni: Alexander Timofeevich, Inforceproject; dr. Alexey Shakhvorostov, Inforceproject; dr. Vladimir Travush, Gorproject; Ahmad Abdelrazaq, Samsung C&T, december 2014.



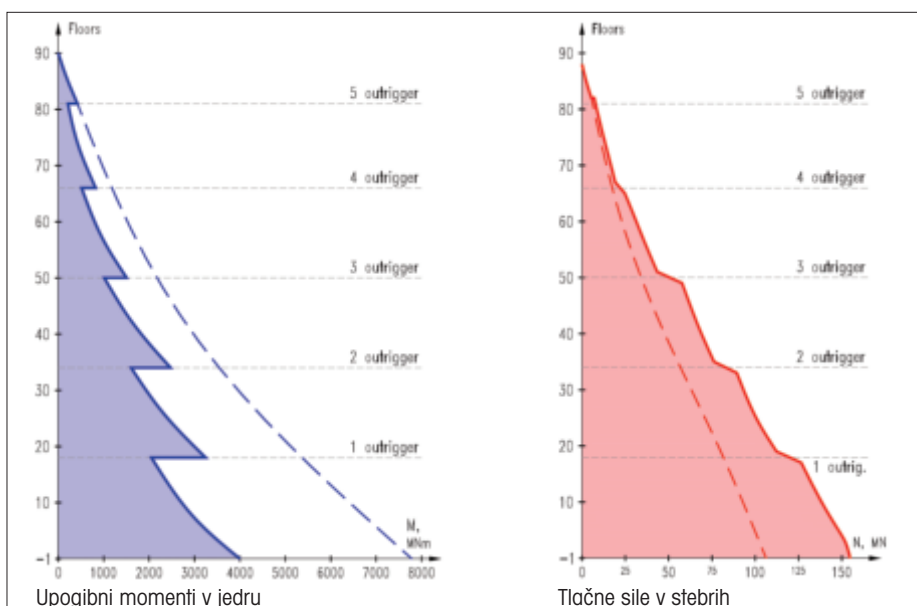
Slika 23 • Horizontalni pomik zgornje etaže v odvisnosti od števila prečnikov.



Slika 24 • Prikaz odstranjenega stebra v tlorisu.



Slika 25 • Prikaz posledic odstranjenega stebra v narisu.



Slika 26 • Vpliv prečnikov na upogibne momente v jedru in osne sile v stebrih.



Slika 27 • Jekleno paličje v prečnikih.

Delovanje prečnikov v primeru odstranitve enega stebra v florisu (slika 24) in narisu (slika 25) je opisano v nadaljevanju.

V stebrih nad odstranjenim stebrom se pojavi nateg in obtežba se prenese v zgornji prečnik. Zato so vsi stiki stebrov projektirani tako, da prenesejo morebitni nateg v takem primeru. Konstrukcija je varna pred progresivno porušitvijo celo v primeru, če bi bili odstranjeni vsi obodni stebri.

Pri obtežbi z vetrom prečniki zmanjšajo upogibni moment v jedru in povečajo tlačno silo v stebrih za 20 do 30 % (slika 26).

Prečniki so betonski sovprežni nosilci, visoki dve tehnični etaži. Podprti so z jedrom in obodnimi stebri. Debeli so 1200 mm, vanje pa je vstavljeno jekleno paličje (slika 27).

Zgornji in spodnji pasovi prečnikov so na stiku z jedrom povezani z dvema krožnima nosilcema (slika 28). Prečni presek prečnikov je oblike črke I (slika 29).

Skupaj s stropnimi ploščami sestavljajo prečniki toge škatlaste konstrukcije, ki zagotavljajo sodelovanje jedra in stebrov pri obtežbi vetra in preprečujejo progresivno porušitev konstrukcije nebotičnika (slika 30).

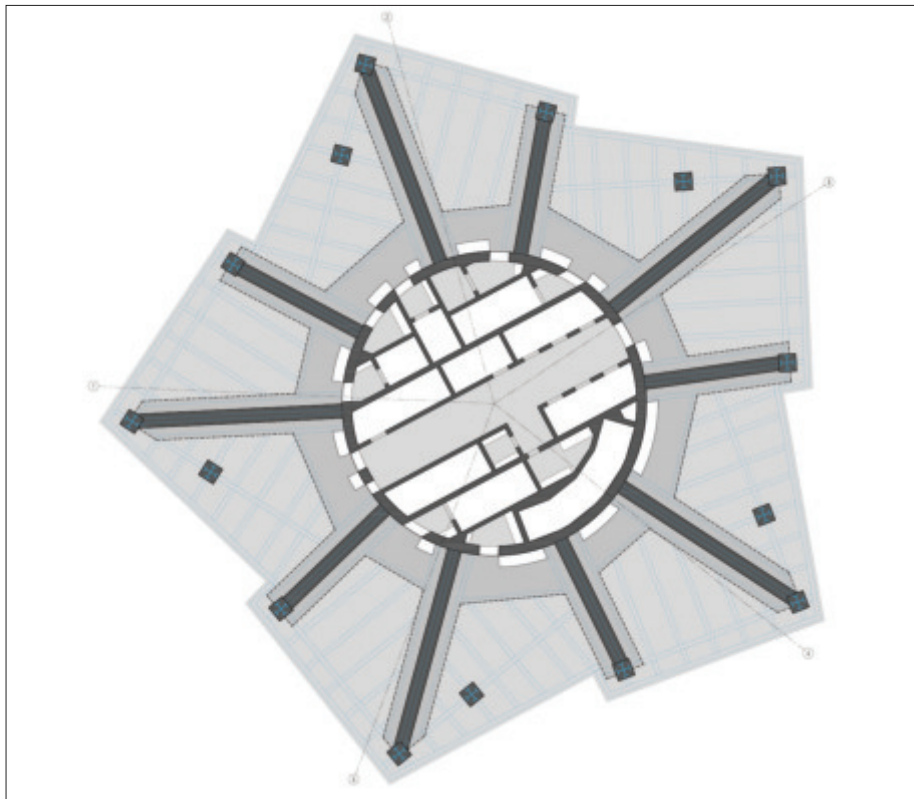
Prečne ojačitve so projektirane kot armiranobetonski nosilci-stene z jeklenim paličnim nosilcem v armiranem betonu. Za nosilce prečnih ojačitev je bil uporabljen beton s tlačno trdnostjo razreda C70/85.

Jekleni palični nosilci so projektirani tako, da prenesejo obtežbo vetra v času gradnje stolpnice pred vgradnjo armiranobetonskih prečnih ojačitev konstrukcije. Jeklena paličja za prečno ojačitev konstrukcije so izdelana iz jekla S390.

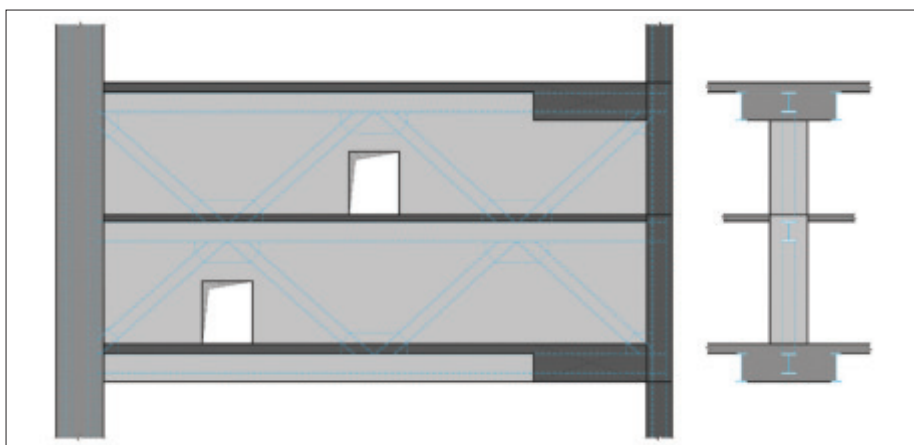
Jekleno paličje in armatura prečnikov, spodnje plošče in krožnega nosilca so na slikah 31, 32, 33 in 34.

Armiranobetonsko jedro ima krožno obliko in je glavni nosilni element konstrukcije nebotičnika. Jedro prevzame in prenese na temelj vertikalne in horizontalne obtežbe vključno s torzijskimi obtežbami, ki so stalno prisotne zaradi geometrije konstrukcije.

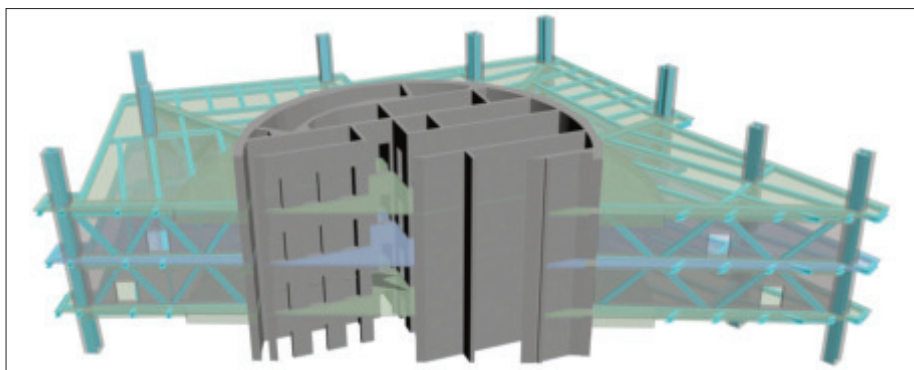
Debelina zunanjih sten jedra je 2500 mm v etažah -3. in -2., v etažah -1. in 1. 2000 mm, v etažah 2. in 3. 1700 mm, v etažah 4. in 5. 1400 mm, v etažah 6. in 7. 1100 mm, v etažah 8.–67. 800 mm, v etažah 68.–80. 600 mm, v etažah 81.–89. 400 mm. Debelina zunanjih sten jedra je bila določena z izračunom za vse vrste vplivov kot tudi v skladu s konstrukcijskimi zahtevami (število in lokacije lukenj, odprtín, raster armaturnih mrež itd.).



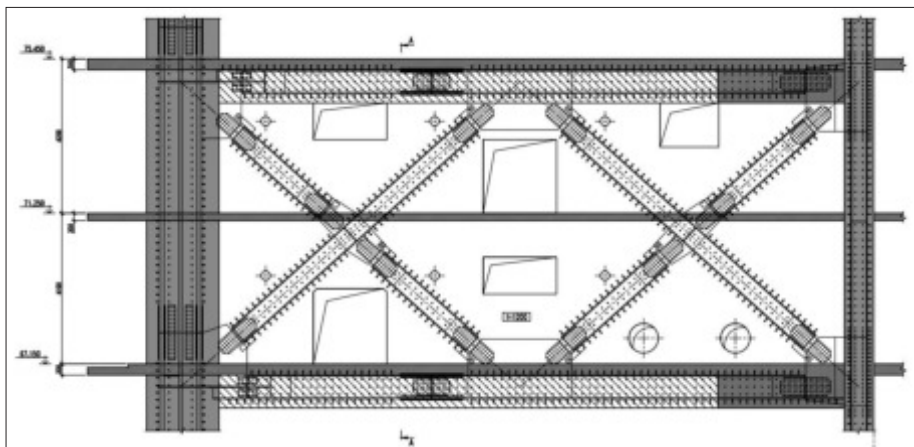
Slika 28 • Prečniki v tlorisu.



Slika 29 • Prečni prerez prečnikov.



Slika 30 • Pogled 3D na konstrukcijo prečnikov.



Slika 31 • Vzdolžni prerez prečnika; na levi steber na obodu etaže, na desni krožna nosilca in stena jedra.



Slika 32 • Jekleno paličje prečnika v 33. in 34. etaži.

Zunanji premer jedra od 8. do 58. etaže je 26,1 m, od 59. do 80. etaže pa se zunanji premer jedra zmanjša do 21,0 m.

Za pritržitev jeklenih nosilcev medetažnih plošč tipskih etaž na zunanje stene jedra so v zunanjih stenah jedra vgrajeni pritrdilni elementi. Poleg vertikalne obtežbe omenjeni pritrdilni elementi prevzamejo tudi sile, ki se pojavijo zaradi globalne torzije nebotičnika.

Med projektiranjem je bila posebna pozornost namenjena enakomerni razporeditvi vratnih odprt in inštalacijskih prebojev v zunanjih stenah jedra, da bi zagotovili enakomerno porazdelitev togosti po obodu jedra.

Za stene osrednjega jedra stolpnice je uporabljen beton s tlačno trdnostjo razreda C70/85.

Detajl armature zunanje stene jedra je prikazan na sliki 35.

Deset sovprežnih stebrov, razporejenih po obodu stolpnice, je povezanih z jedrom s prečniki. Za zmanjševanje razpona med stebri je predvidenih še 5 sovprežnih stebrov do nivoja 56. etaže. Ti stebri prevzamejo samo vertikalne obtežbe.

Sovprežni stebri so izdelani iz kovinskega jedra in zaliti z betonom. Material kovinskega jedra je jeklo HISTAR 460 (High Strength ArcelorMittal) proizvajalca ArcelorMittal. Kovinsko jedro je izdelano v obliki križa, sestavljenega iz I-profilov HL po ASTM A 6/A 6M-12 in dodanih T-profilov, izrezanih iz I-profilov. Za spajanje elementov kovinskega jedra so uporabljeni neprekinjeni kotni zvari.

V skladu z arhitekturnim konceptom so sovprežni stebri razporejeni v spiralo, s čimer je omogočena zasukana oblika fasade stolpnice. Prelom osi kovinskega jedra stebra je izveden na nivojih lihih etaž. Spoj na nivoju preloma osi jedra stebra je izdelan s prirobnicami iz jeklene pločevine razreda S440 po GOST-u 27772-88. Neposredni prenos horizontalne komponente sile na mestu preloma osi stebrov je izveden na nivoju medetažne plošče. Montažni spoj jeder stebrov je izveden na višini 1200 mm nad nivojem medetažne plošče. Montažni spoji jeklenih jeder stebrov so vijaki. Spoji so izdelani v vsaki drugi etaži.

Za zagotovitev skupnega delovanja jeklenega jedra stebra z armiranim betonom so predvideni čepi, ki so bili nameščeni na jedra stebrov že v tovarni proizvodnji.

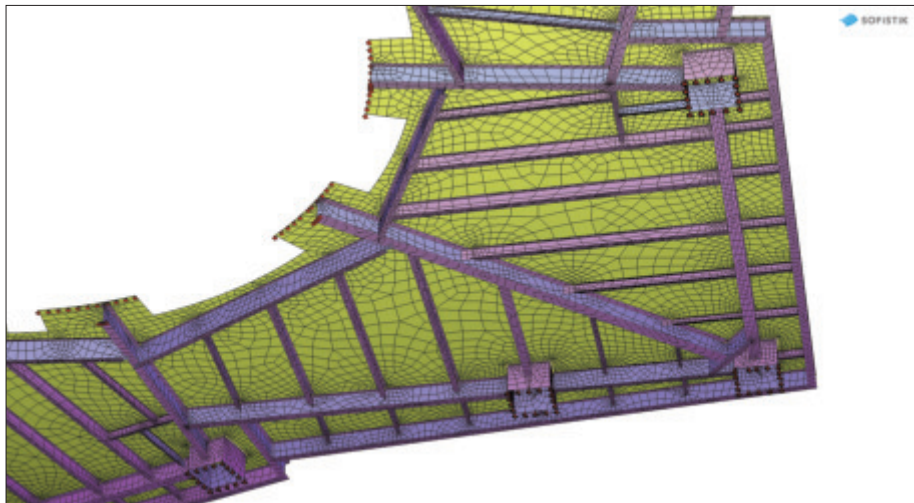


Slika 33 • Jekleno paličje ter armatura spodnje plošče in krožnega nosilca.

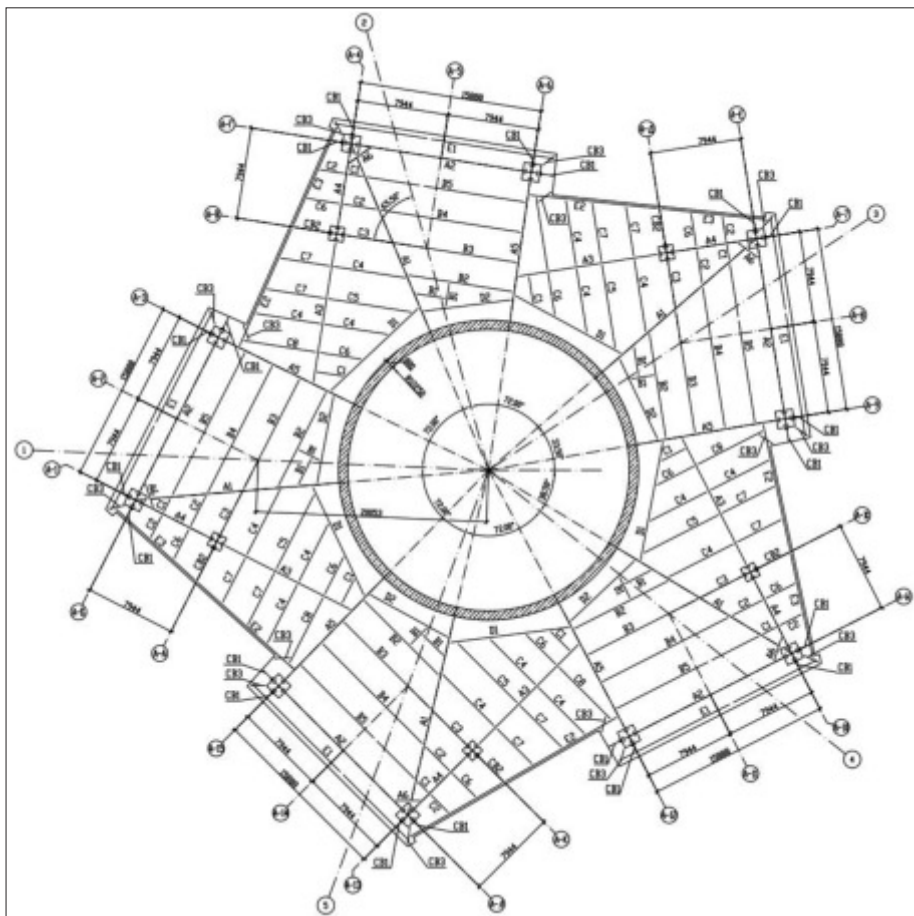


Slika 34 • Armatura stene prečnika v 33. etaži.

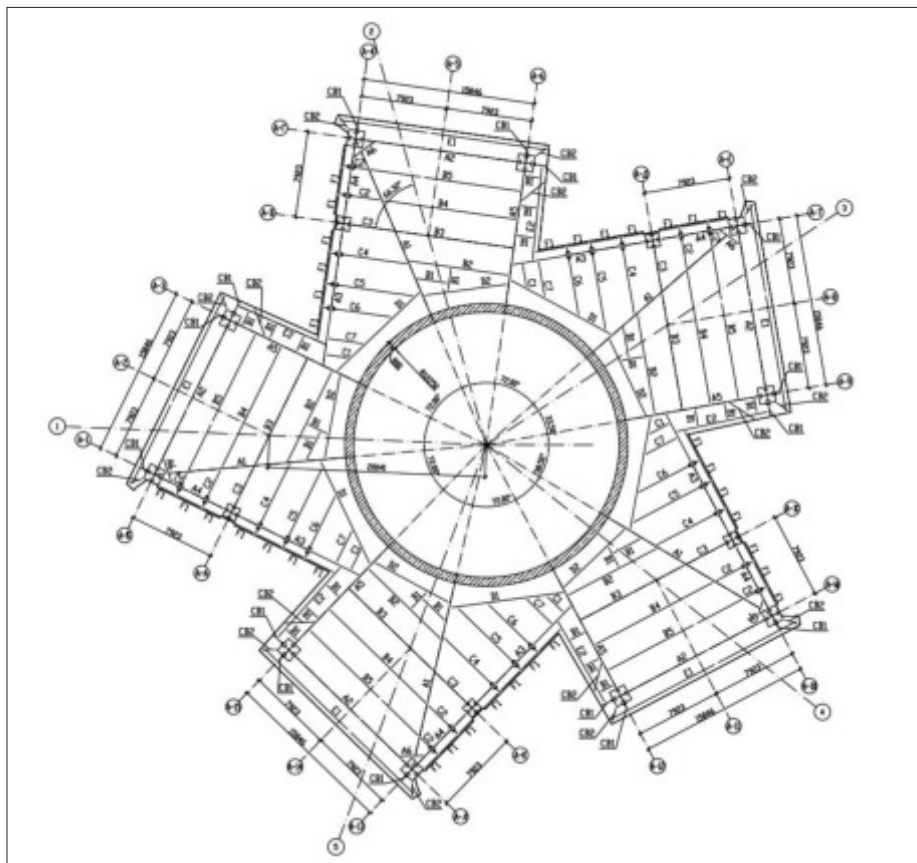




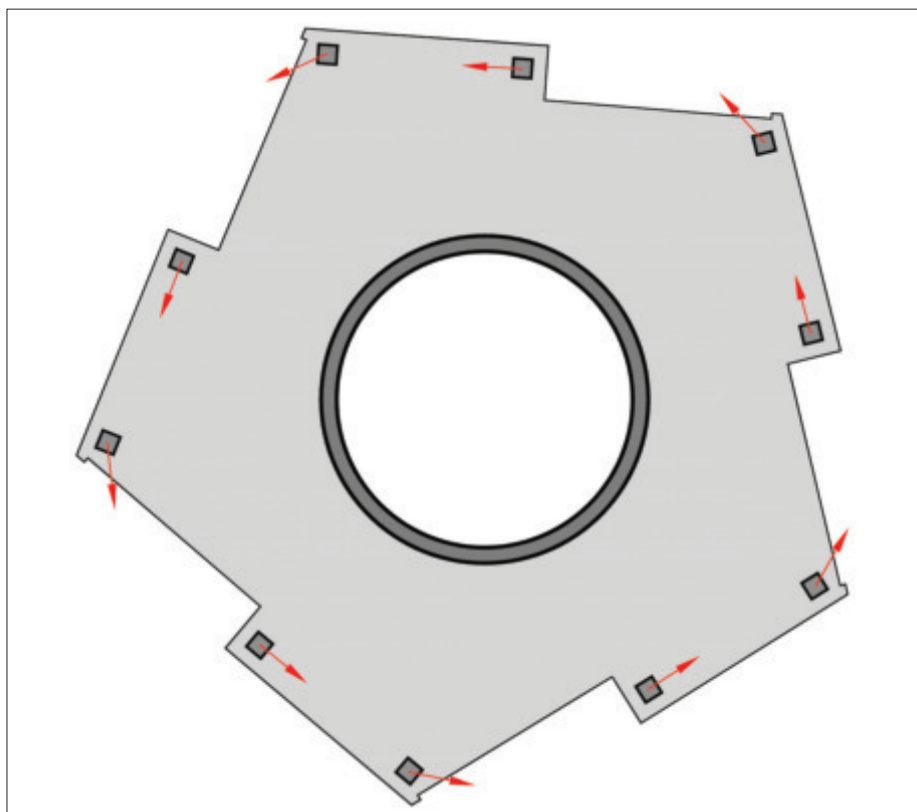
Slika 38 • Pogled od spodaj na del jeklene konstrukcije stropa.



Slika 39 • Razpored jeklenih nosilcev stropa na 25. etaži.



Slika 40 • Razpored jeklenih nosilcev stropa na 26. etaži.



Slika 41 • Sile, s katerimi delujejo stebri na etažne plošče.

Razred tlačne trdnosti betona sovprežnih stebrov je C70/85.

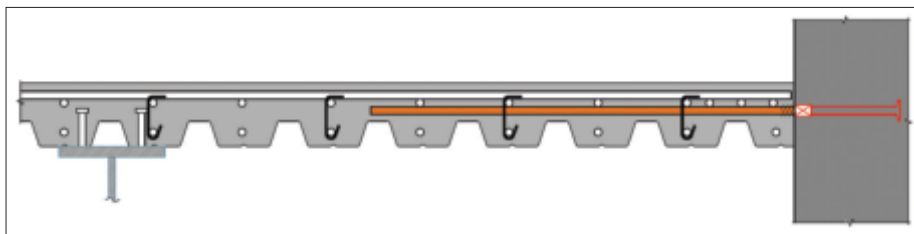
Prezrez stebra je prikazan na sliki 36.

Medetažne konstrukcije zunaj jedra so sovprežne (slike 37–40). Plošče so izvedene na fiksnem opažu iz profilirane pločevine, ki sloni na jeklenih nosilcih. Debelina medetažnih plošč znaša 150 mm. Za plošče je uporabljen beton trdnostnega razreda C35/45. Skupno delovanje armiranobetonskih plošč z jeklenimi nosilci je zagotovljeno s čepi, ki so privarjeni na zgornjo pasnico nosilcev. Jekleni nosilci so izdelani iz valjanih I-profilov v skladu z ruskimi tehničnimi pogoji STO ASČM 20-93, presek profila do 40B2 (ruski standard). Višina profila varjene izvedbe je 750 mm, material – jeklo S345-3 po GOST-u 27772-88, S390 (10XCHDA) po GOST-u R 55374-2012. Vozlišča in montažni spoji nosilcev so izvedeni z visokotrdnimi vijaki M24 trdnostnega razreda 10.9. Za stike nosilcev z armiranobetonskimi konstrukcijami jedra so uporabljeni vgradni pritrdilni deli in izvršeno montažno varjenje.

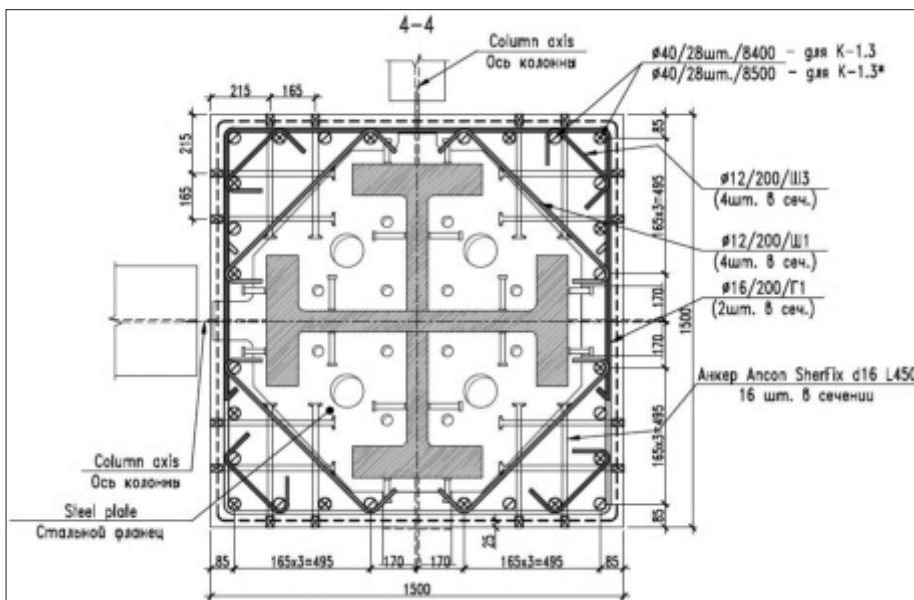
Zaradi posebne oblike nebotičnika mora vsaka medetažna plošča prevzeti precej velike horizontalne sile, ki se pojavljajo zaradi preloma osi stebrov, in prenesti te stalno delujoče sile na jedro stolpnice (slika 41). Zato so predvidene rešitve, ki upoštevajo značilnosti delovanja medetažnih plošč:

- ojačano armiranje monolitnih plošč po celi površini za prenos natezne in strižne sile od nagiba stebrov na jedro;
- uporaba armature in čepov, ki zagotavljajo prenos sile globalne torzije na osrednje jedro stolpnice. Armatura je potrebna zaradi številnih komunikacijskih kanalov, ki potekajo po obodu zunanje stene jedra.

Prenos vodoravnih sil med stebri in ploščami ter ploščami in zunanjo steno jedra, velikih od 100 do 200 kN, je zagotovljen s posebnimi sidri, ki v kombinaciji armaturnimi palicami z navoji poenostavijo stik med ploščami in stebri oziroma stenami. Sidra so vgrajena v stebre in stene, pri čemer so navoji v sidru zaščiteni pred zalitjem s cementnim mlekom. Po odstranitvi opaža stene ali stebra ter zaščite navoja je v sidro mogoče priviti armaturne palice. Tako se izognemo vrtnanju betona. Na slikah 42 do 50 sta prikazana stikovanje plošč in stene jedra, jeklenih nosilcev stropov in stene jedra ter montaža jeklenih nosilcev stropov.



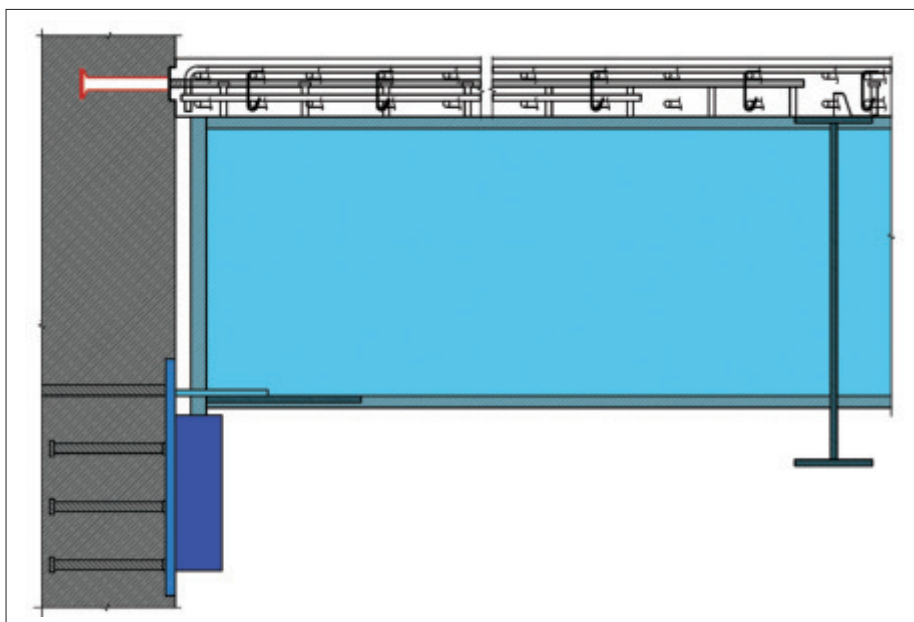
Slika 42 • Stik plošče s steno jadra.



Slika 43 • Razpored sider v prerezu stebra na stiku s ploščo.



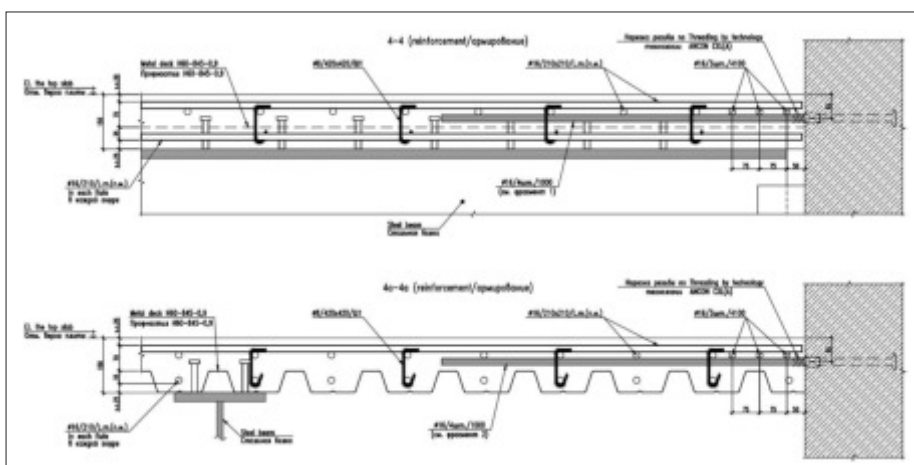
Slika 44 • Armatura stebra in sidra v vogalu stebra.



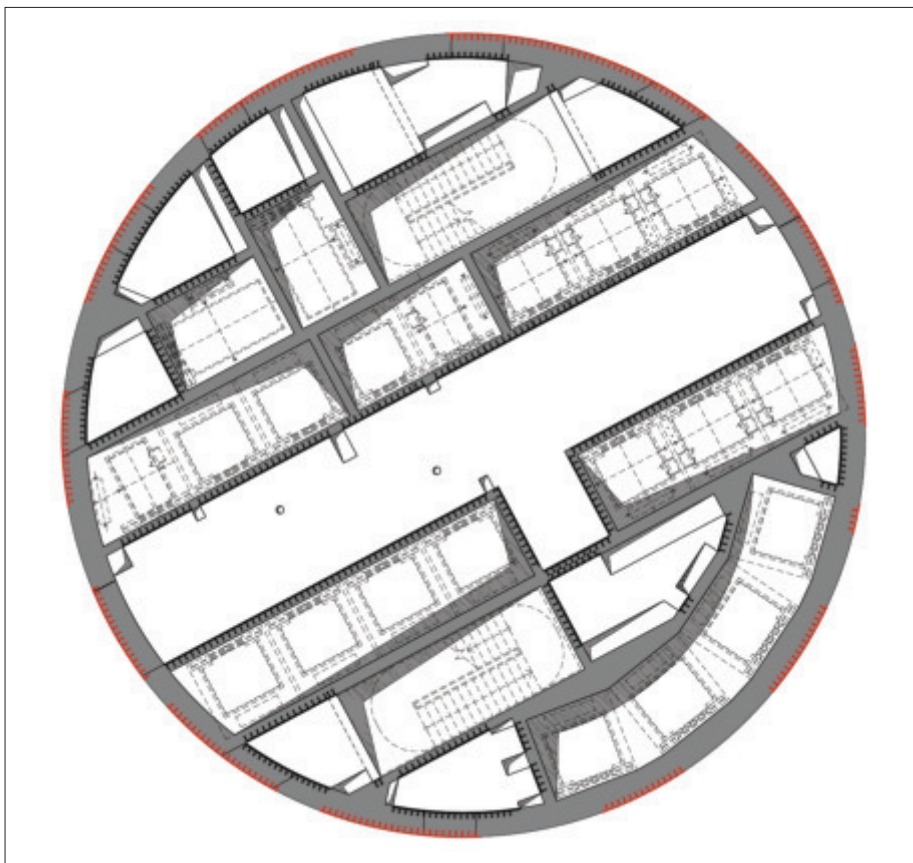
Slika 45 • Stik stropne plošče in nosilca stropa s steno jedra.



Slika 46 • Stik nosilca stropa s steno jedra.



Slika 47 • Detajl sovprežne medetažne konstrukcije na stiku s steno jedra.



Slika 48 • Razpored sider po obodu zunanje stene jedra in v notranjih stenah jedra.



Slika 49 • Montaža nosilcev plošče.



Slika 50 • Vijačeni stik nosilca plošče.

2.3 Konstrukcija zgornjega stožčastega dela stolpnice

Zgornji, stožčasti del nebotičnika (slika 51) je funkcionalno in konstrukcijsko razdeljen na dva dela:

- pohodni ogrevani del, ki vključuje razgledne ploščadi ter dvigala in rampe za dostop do njih;

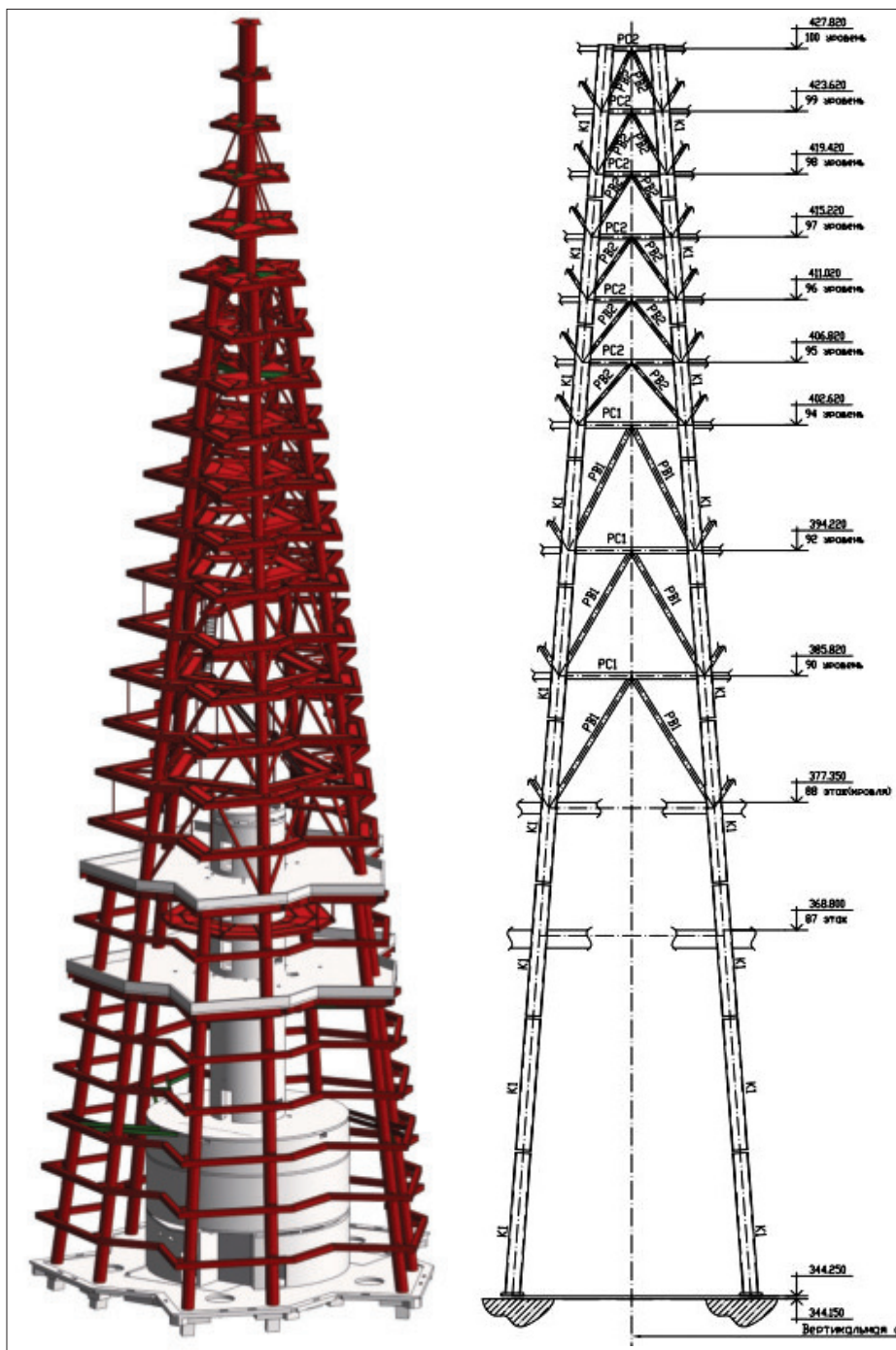
- tehnični neogrevani del nad koto 87. etaže, ki ima ograjo v obliki jeklene mreže.

Zgornji, stožčasti del je zasnovan v obliki peterokotne piramide, zgrajene okoli osrednjega armiranobetonskega jedra, in se opira na medetažno ploščo na koti 344.400 na mestih, kjer so stebri. Višina stožčastega dela je okoli 118 metrov,

dolžina osnovnega roba piramide pa okoli 16,3 metra.

Stebri zgornjega stožčastega dela so na nivoju 83. etaže podprti s stebri po oseh preseka in so v navpični ravnini nagnjeni proti osi nebotičnika.

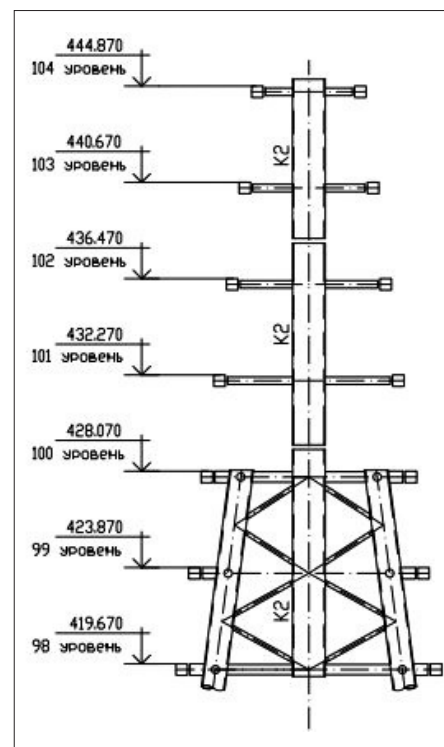
Na koti 87. etaže (368.800) je medetažna plošča, na kateri je nameščena oprema za



Slika 51 • Konstrukcija stožčastega dela nebotičnika.

vzdrževanje fasade, na koti 88. nivoja pa medetažna plošča, ki ločuje spodnji ogrevani del piramide od zgornjega neogrevanega tehničnega dela. Nad koto 377.350 so stebri piramide povezani med seboj s sistemom trikotnih vertikalnih povezav. Stabilnost celotne konstrukcije zgornjega stožčastega dela je zagotovljena z jedrom kot tudi s sistemom vertikalnih povezav med stebri (nad koto 88. nivoja 377.350).

Stebri, razpirala in vertikalne povezave so izdelani iz okroglih cevi. Konica stožčastega dela nebotičnika je izdelana iz jeklene cevi premera 1420 mm, v notranjosti katere so lestve za dostop do zgornje točke stolpnice (slika 52). Montažne povezave elementov konstrukcije stožčastega dela so izvedene z visokotrdnimi strižnimi vijaki in z montažnimi zvari.



Slika 52 • Konstrukcija vrha stožčastega dela nebotičnika.

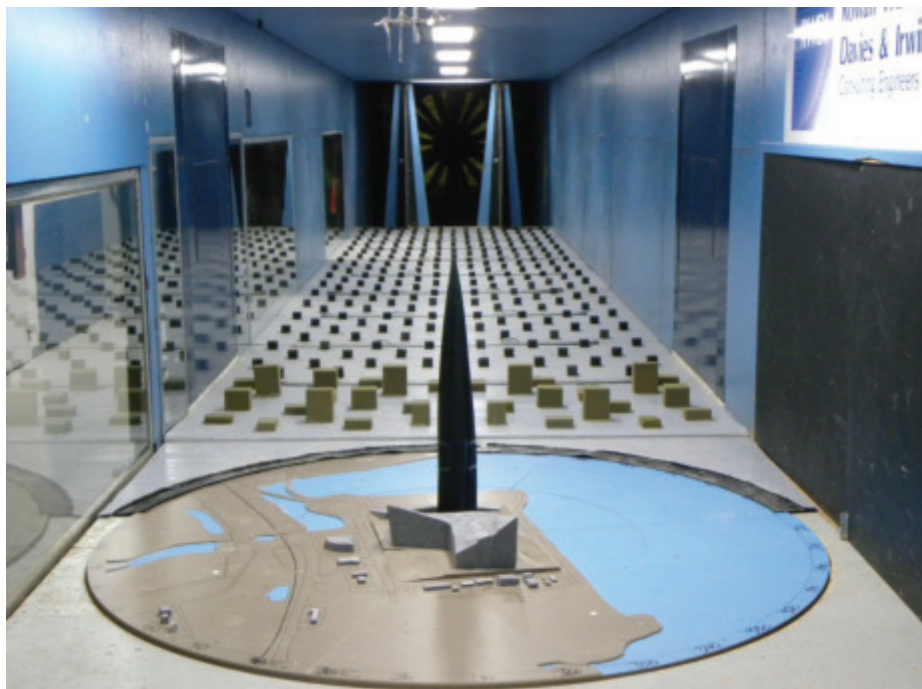
3 • IZRAČUNI GRADBENIH KONSTRUKCIJ

Osnovni izračuni gradbenih konstrukcij za Lakhta Center so bili izvedeni v programu Lira SAPR in preverjeni v programu Sofistik. Skupno število končnih elementov v modelu je znašalo 524.000. Togost pilotnega temel-

ja pod škatlastim temeljem je bila opredeljena z določitvijo paličnih končnih elementov s togostjo, ki ustreza togosti posameznih pilotov. V procesu izračunavanja je bila togost vseh 264 pilotov ponovno preverje-

na z metodo iteracij. Za določitev togosti armiranobetonskih in sovprežnih elementov konstrukcije je bil uporabljen povprečni modul elastični.

Vertikalne obremenitve nebotičnika so bile vzete v skladu z veljavnimi normami projektiranja in projektno nalogo. Zanimivo je, da lastna teža vseh konstrukcij in stalne obtežbe (nenosilni materiali in konstrukcije)



Slika 53 • Model stolpnice Lakhta Center v aerodinamični cevi, RWDI.

predstavljajo 84 % od celotne karakteristične teže 4.930.000 kN (z upoštevanjem teže škatlatega temelja). Pri izračunu konstrukcije stolpnice je bila poleg gravitacijskih obtežb odločilna obtežba vetra. Raziskavo modela stolpnice Lakhta Center v aerodinamični cevi je opravila družba RWDI (slika 53) (Stoyanoff, 2015).

Vsota vseh horizontalnih sil od izračunane obtežbe vetra je znašala 48.360 kN, in sicer 30.790 kN (64%) ob srednji hitrosti vetra in 17.580 kN (36 %) ob sunkih vetra. Vrednost momenta od delovanja sile celotnega izračunanega vetra na nivoju vrha spodnje plošče škatlatega temelja je 9.379.000 kNm (6.282.000 kNm ob srednji hitrosti vetra in 3.097.000 kNm ob sunkih vetra) (slika 54).

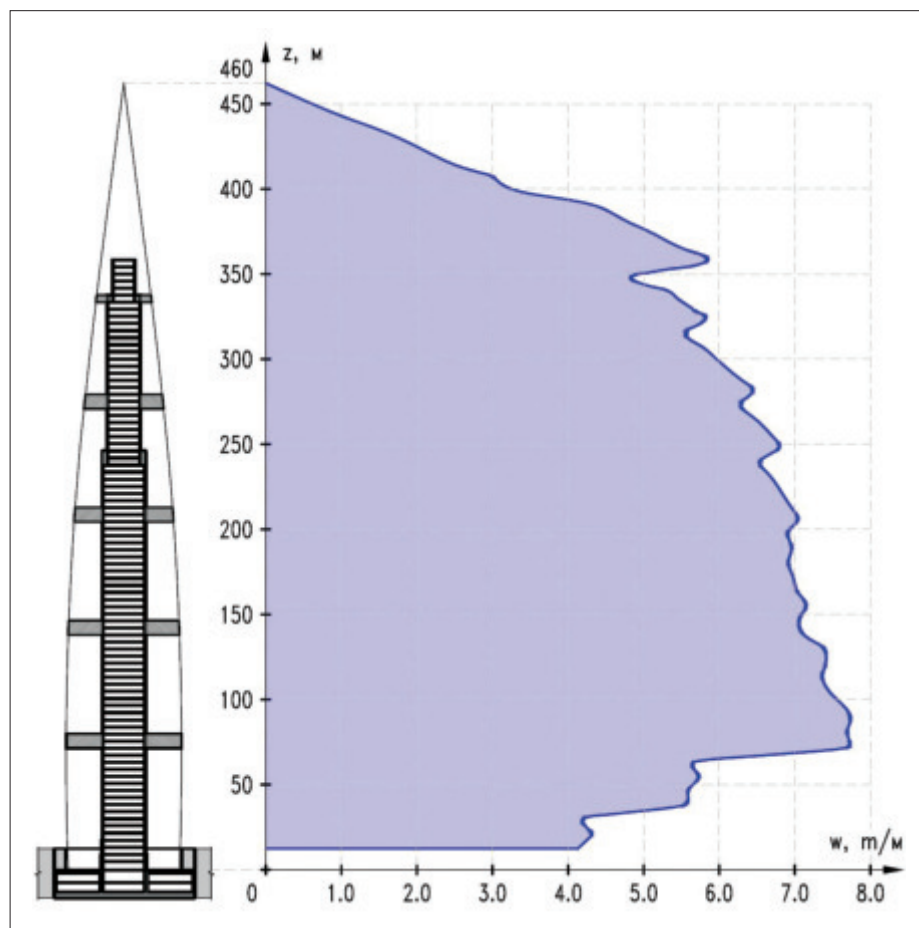
Modeliranje pilotnega temelja pod škatlstim temeljem je bilo izvedeno z linijskimi končnimi elementi z različnimi materialnimi lastnostmi. Za modeliranje armiranobetonske medetažne plošče podzemnega dela stolpnice in armiranobetonske stene, vključno z zunanjimi in notranjimi stenami jedra, so bili uporabljeni ploskovni končni elementi, za nosilne stebre in nosilce (medetažnih konstrukcij) pa linijski končni elementi. Za modeliranje medetažne konstrukcije nazemnega dela stolpnice so bili izbrani naslednji končni elementi: za nosilce linijski elementi, za plošče na profilirani pločevini pa ploskovni končni elementi. Za analizo napetostnega

stanja v osrednjem jedru ter preverjanje nosilnosti preklad so v zunanjih stenah

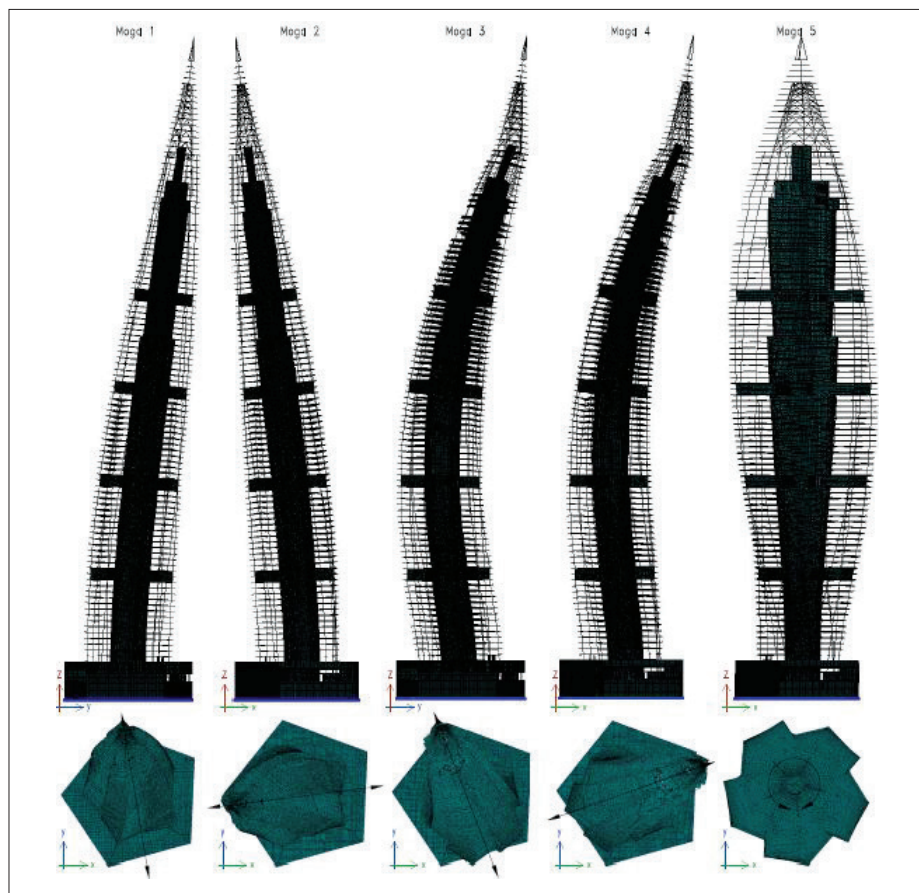
upoštevane odprtine. Računski model stene je bil razdeljen na končne elemente velikosti 1 m. Jeklene konstrukcije nadzemnega dela stolpnice (stebri, nosilci medetažnih plošč) so modelirani kot linijski končni elementi. Modeliranje sovprežnih stebrov je bilo izvedeno z linijskimi končnimi elementi z določeno togostjo. Prečniki so bili modelirani kot ploskovni končni elementi, katerih togost ne upošteva montažnega jeklenega paličja, ker je togost monolitne stene debeline 1200 mm precej večja od togosti paličja.

Za izračun lastnih frekvenc zgradbe so bile vzete karakteristične trajne vrednosti vertikalnih obtežb brez upoštevanja varnostnega faktorja γ_n . Vrednost frekvenc osnovnih lastnih nihajnih oblik, katerih modalna masa največ prispeva k dinamičnemu delovanju stavbe, je prikazana v preglednici 6.2. Tako je skupna modalna masa prvih osmih lastnih nihajnih oblik znaša ca. 75 % celotne modalne mase. Modalna analiza je upoštevala okoli 100 lastnih nihajnih oblik.

Za oceno udobja bivanja v zgornjih etažah stolpnice so ključni kazalniki vrednosti hori-



Slika 54 • Diagram porazdelitve obtežbe vetra po višini stolpnice za projektne srednje hitrosti vetra.



Slika 55 • Oblike lastnih nihanj nebotičnika Lakhta Center.

zontalnih pomikov vrha stolpnice in pospešek nihanja medetažnih plošč pri sunkih vetra (preglednica 1).

bil izračunan na podlagi prvih 14 lastnih frekvenc, ki so manjše od mejne vrednosti (preglednica 2).

Nivo	Višina H , m	Normativni pomiki		Vsota Δ_n , mm	Relativni pomik vrha zgradbe Δ_n/H
		pri srednji hitrosti vetra Δ_n^m , MM	pri sunkih vetra Δ_n^g , MM		
Medetažna plošča zgornje etaže, kjer se nahajajo pisarne	340,05	191	102	293	1/1176
Medetažna plošča razgledne ploščadi	356,85	204	109	313	1/1155
Niz zgornjega stožčastega dela stolpnice	428,07	301	161	462	1/937

Opomba: Za določitev višine niza stolpnice je bila vzeta kota vrha škatlastega temelja: -4.650.

Preglednica 1 • Vrednosti horizontalnih pomikov vrha konstrukcije stolpnice ob obtežbi vetra.

Vrednost horizontalnega pomika vrha stolpnice je skoraj dvakrat manjša od vrednosti, ki je določena z normami:

$$\Delta_n/H = 1/937 \leq [1/500]$$

Pospešek od delovanja dinamične komponente obtežbe vetra (sunki vetra) je

Pospešek $a_d = a_x$ se izračuna po formuli:

$$a_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{n=14} (0.7 \cdot \omega_i^2 \cdot \Delta_{xi})^2},$$

kje $\omega_i = 2\pi f_i$ – krožna frekvenca, ki izhaja iz modalne analize, Δ_{xi} – pomik točke, za

katero se izračuna pospešek od delovanja normativne dinamične komponente obtežbe vetra (pri sunkih vetra).

Pospešek nihanja, ki je bil določen za medetažno ploščo zgornje etaže, kjer so pisarne, znaša $0,0486 \text{ m/s}^2$, kar je 1,65-krat nižje od mejne vrednosti pospeška nihanja medetažnih plošč zgornjih etaž $0,08 \text{ m/s}^2$, ki je določena z zahtevami STU (Posebni tehnični pogoji) za projektiranje stolpnice Lakhta Center.

Št. nihajne oblike	Krožna frekvenca ω_i , rad/s	Pomik Δ_{xi} , mm	$0.7 \cdot \omega_i^2 \cdot \Delta_{xi}$, mm/s ²
1	0,70	2,4	0,82
2	0,72	94,3	34,22
3	3,11	0	0
4	3,29	0,4	3,03
5	4,69	0	0
6	6,21	0,2	5,40
7	6,69	0,6	18,80
8	8,33	0	0
9	10,89	0	0
10	11,69	0	0
11	12,26	0	0
12	12,42	0	0
13	14,21	0,2	28,27
14	15,80	0	0
Končni pospešek $a_x =$			48,61

Preglednica 2 • Rezultati izračuna pospeška nihanja zgornje etaže.

4 • FAZE GRADNJE

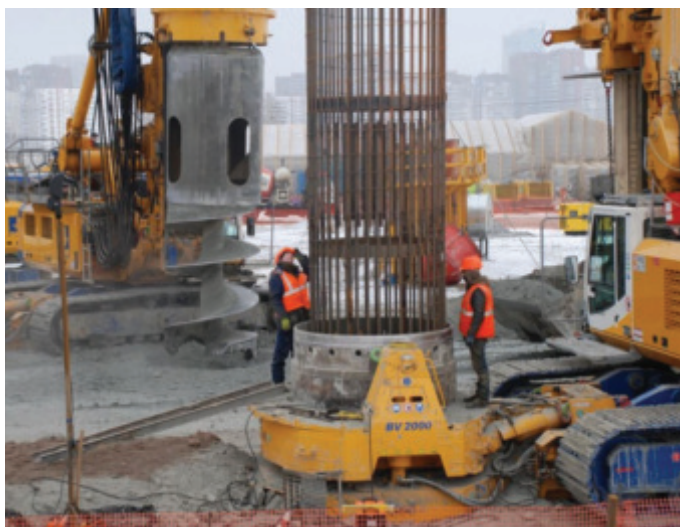
Gradnja nebotičnika Lakhta Center se je začela oktobra 2012. Temeljna konstrukcija stolpnice leži na 264 uvrtnih pilotih, postavljenih s površine temeljnih tal. Premer pilotov je 2 metra, dolžina pa 55 m in 65 m (oz. 72 m in 82 m z upoštevanjem globine vrtnja) (slika 56). Nato je bila izvedena zaščitna konstrukcija gradbene jame z uporabo obodnih vkopanih sten in monolitnih armiranobetona-

za škatlasti temelj je znašala 46.000 m³. Količina betona za spodnjo ploščo škatlastega temelja debeline 3,6 metra je znašala približno 19.624 m³. Ta številka je bila vpisana v Guinnessovo knjigo rekordov kot največja količina betona pri neprekinjenem betoniranju.

Pri gradnji nadzemnega dela stolpnice so bile aktivno uporabljene napredne

konstrukcij kovinskih jeder sovprežnih stebrov in kovinskih nosilcev medetažnih plošč (slika 59) je sledilo opaževanje, armiranje in betoniranje sovprežnih stebrov in medetažnih plošč.

Montaža konstrukcije zgornjega stožčastega dela nebotičnika (slika 60) višine 118 m se je začela z nivoja 83. etaže (kota 344.400). Vrh stožčastega dela stolpnice je na koti 462 m. Montaža zgornjega stožčastega dela stolpnice je bila zaključena na začetku leta 2018.



Slika 56 • Vstavljanje armaturne kletke uvrtnega pilota.



Slika 57 • Zaščita gradbene jame.

skih plošč po metodi »od zgoraj navzdol« (angl. semi-top-down) (slika 57).

Naslednji pomembni korak je bila izgradnja škatlastega temelja (slika 58), ki vključuje dve podzemni etaži. Skupna količina betona

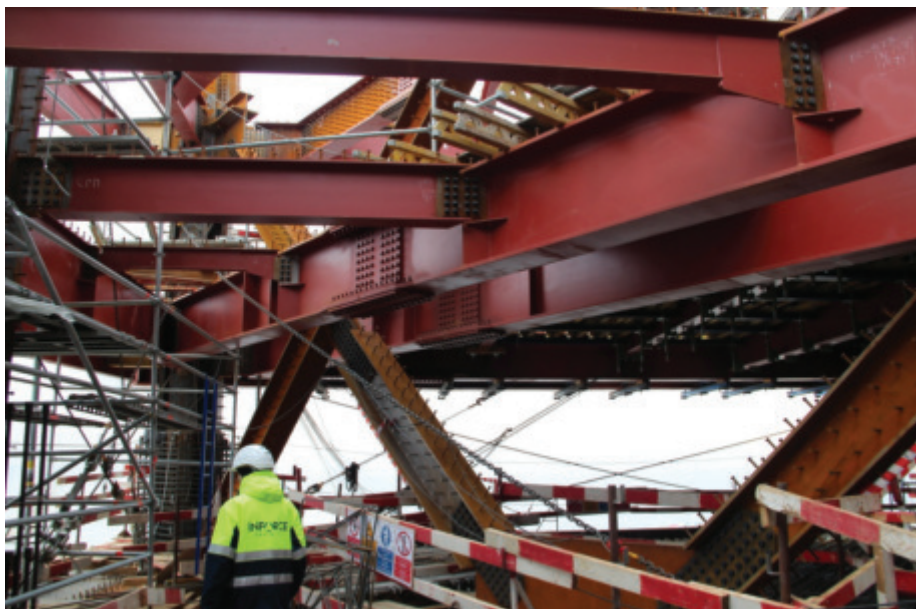
tehnologije. Najprej se je začela gradnja armiranobetonskega jedra (slika 58). Z zamikom je potekala gradnja etažnih plošč, tako da je gradnja osrednjega jedra prehitevala gradnjo plošč za 5–7 nivojev. Montaži



Slika 58 • Armiranje škatlastega temelja.



Slika 59 • Gradnja prvih etaž stolpnice.



Slika 60 • Postavitev jeklenih konstrukcij etažnih plošč.



Slika 61 • Montaža konstrukcije koničastega vrha stolpnice (Foto: V. Gusik).

5 • ZAKLJUČEK

Nebotičnik Lakhta Center (slika 62) je produkt dela številnega tima projektantov, gradbincev in predstavnikov investitorja. Nebotičnik Lakhta Center je postal rekord po dosežkih v

gradbeništvu. Lakhta Center je najvišja stavba v Evropi in najvišja stavba na svetu, ki ima zasukano obliko, ki jo omogočajo nagibi nosilnih stebrov, ne pa samo nagib fasadne lupine.

Pri polaganju temeljne plošče je bil dosežen rekord po obsegu neprekinjenega betoniranja, ki je bil tudi vpisan v Guinnessovo knjigo rekordov. Realizacija tega projekta je dvignila nivo in kompetence gradbene industrije ter prispevala k nastanku novih norm projektiranja, na primer »Pravilnik o projektiranju sovprežnih konstrukcij. Osnove projektiranja.«.



Slika 62 • Stolpnica Lakhta Center (Foto: V. Suhorukov).



Slika 63 • Lakhta Center ponoči.

6 • ZAHVALA

Avtor članka se iskreno zahvaljuje prof. dr. Janezu Duhovniku za urejanje in pomoč pri prevodu, Svetlani Stamač za prevod in Mikhailu Desyatkinu za pomoč pri pripravi članka.

7 • LITERATURA

Shakhvorostov, A., Timofeevich, A., Desyatkin, M. Nebotičnik Lakhta Center v Sankt Peterburgu. Načrt gradbenih konstrukcij, Inforceproject LLC, Moskva, 2016.

Stoyanoff, S., Thompson, G., Cui, J., Jiang, Y., Lakhta Center, Wind load report, RWDI, Guelph, Ontario, 2015.

CTBUH, The Global Tall Building Database, www.skyscrapercenter.com/building/lakhta-center/12575, pridobljeno 19. 3. 2019.