

Oprava havarované konstrukce střechy kotelný v Elektrárně Opatovice

Ing. Jaroslav VÁCHA

Ing. Pavel HÁŠA

Excon, a. s.

Praha

Havárie způsobená zřícením střechy kotelný okamžitě vyřadila elektrárnu z provozu, což se velmi nepříznivě dotklo statisíců obyvatel Pardubického a Hradeckého kraje. Kromě výroby elektrické energie slouží elektrárna jako zdroj tepla pro Pardubice, Hradec Králové a okolní menší města. A právě vyřazení zdroje tepla z provozu znamenalo na začátku listopadu 2002 vážný problém pro velkou část východních Čech. Okamžitě po havárii začaly zkoumat její příčiny tři nezávislé expertní týmy (jeden pracoval v rámci policejního vyšetřování, druhý v rámci šetření pojišťovny a třetí přímo na žádost investora). Současně byla zahájena rekonstrukce objektu.

Konstrukce kotelný

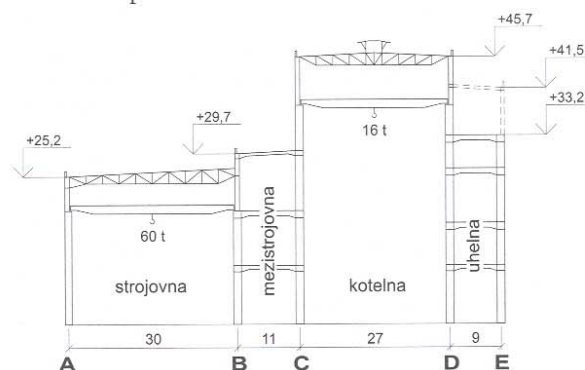
Hlavní výrobní objekt Elektrárny Opatovice (EOP) je čtyřlodní, podélný směr přibližně jih-sever (obr. 1). Jednotlivé lodi jsou řešeny přímo podle požadavků technologie výroby tepla a elektrické energie. Z hlediska výroby je první lodí uhelna (na východní straně) se zásobníky uhlí a pásovými dopravníky (patrový skelet šířky 9 m mezi řadami E-D, střecha v úrovni +33,2 m, v části, kde se napojuje zauhlovací most, +41,5 m). Na uhelnu navazuje hala kotelný, ve které je umístěno šest kotlů (halový objekt šířky 27 m mezi řadami C-D a výšky po střechu +45,7 m). Vedle kotelný je mezistrojovna (patrový skelet šířky 11 m mezi řadami B-C, střecha v úrovni +29,7 m). Poslední lodí z hlediska postupu výroby je strojovna, ve které jsou umístěny turbíny a generátory (halový objekt šířky 30 m mezi řadami A-B, střecha v úrovni +25,2 m). Uhelna a kotelný jsou dlouhé 186,9 m, mezistrojovna a strojovna 252 m. Konstrukce kotelný a uhelny počítala s možností prodloužení těchto lodí.



Obr. 1. Půdorys hlavního výrobního objektu

Příčná vazba celého objektu staticky působí jako celek (obr. 2). Konstrukce uhelny a mezistrojovny jsou plnostěnné patrové vetknuté rámy ze svařovaných profilů I. Vazník kotelný je příhradový a z hlediska celé vazby působí jako dvoukloubový prut. Vazník strojovny je rovněž příhradový, s plnostěnným sloupem v řadě A působí jako polorám. Příčné vazby jsou po 7,5 m, čelní stěny jsou přesazeny o 3 m před hlavní vazby. Vložené dilatační pole 0,9 m je

jedno přibližně 123 m od jižní stěny. Podélná stabilita objektu je zajištěna rámovým ztužením mezi sloupky ve všech řadách po celé délce dilatačního úseku. Nosná konstrukce celého objektu byla vyrobena z oceli řady 37. V kotelně je osazen mostový jeřáb původní nosnosti 32 t (nosnost byla později snížena na 16 t) a ve strojovně je mostový jeřáb nosnosti 80 t (nosnost byla snížena na 60 t). Snížení nosnosti jeřábů bylo provedeno před havárií a nemělo s ní přímou souvislost.



Obr. 2. Příčný řez hlavním výrobním objektem

Obvodový plášť celého objektu byl zděný (zdivo před-sazeno před ocelovou konstrukcí a vodorovně kotveno do sloupů ocelovými příponkami). Zdivo bylo rovněž ztuženo železobetonovými věnci. Stav zdiva není příliš dobrý ani v částech objektu, který nebyl havárií zasažen. Zdivo je potřesané zejména vlivem teplotních změn (plášť není zateplen, ve většině prostor výrobního objektu je trvale vysoká teplota přes 30 °C, zatímco vnější povrch reaguje na klimatické vlivy) a chvěním konstrukce při provozu kotlů a turbín.

Střešní plášť byl ze železobetonových panelů (rozpětí cca 3 m) uložených na ocelové vaznice. Panely byly na části střechy žebírkové a na části dutinové. Na panelech byla vrstva cementového potěru tloušťky od 20 do 110 mm a různé objemové hmotnosti (až 1 800 kg/m³). Nabetonovaná část byla chráněna hydroizolací. V době havárie se prováděly rekonstrukční práce na střeše větrací nástavby kotelný, které spočívaly ve výměně nenosných vrstev včetně betonové mazaniny. Tyto práce probíhaly bez statického posouzení původní konstrukce. Pod střešním pláštěm kotelný a strojovny bylo průběžné svislé a vodorovné ztužení na celou délku dilatačního úseku (v kotelně bylo svislé ztužení mezi vazníky ještě propojeno se svislým ztužením větrací nástavby v mohutný podélný příhradový nosník výšky cca 5 m).

Příčiny destrukce střechy kotelný

Ke zřícení střechy kotelný došlo náhle v ranních hodinách. Podle záznamu o postupném odstavování jednotlivých kotlů se celá střecha zřítila během 10 sekund (řídící systém automaticky odstavuje kotle v případě mimořádné události při provozu, v daném případě jím byl pád konstrukce na plášť jednotlivého kotle). Vyšetřování prokázalo, že počát-

kem havárie bylo porušení dolního pásu vazníku u severní štítové stěny. Změněný statický systém vazníku se potom utrhł od sloupů (připoj přes čelní desky). Vzhledem k silnému podélnému vyztužení mezi vazníky a obrovské kinetické energii těžkého betonového pláště se destrukce prvního vazníku dominově přenesla na sousední vazníky a přes dilataci (která pohyby konstrukce nebyla schopna absorbovat) i na druhou část střechy za dilatací. Zřítla se celá konstrukce střechy kotelny, tj. střešní plášť, vaznice včetně ztužení i vazníky – celkem cca 1 700 t materiálu. Z konstrukce zůstaly pouze sloupy. Horní dřívky sloupů nad jeřábovou dráhou byly havárií deformovány (většinou směrem dovnitř haly), některé sloupy kromě celkového zakřivení vykazovaly i lokální plastické deformace (prolomení pásnice a vyboulení stěny v místech nevhodně řešených detailů připoje jeřábové dráhy, především u sloupů v řadě D). Pohled do kotelny po zřícení střechy je na obr. 3.

Ze závěrů expertiz vyplývá, že příčin zřícení ocelové konstrukce bylo několik:

- celá konstrukce střechy byla poddimenzovaná jak z hlediska tehdejších, tak i dnešních požadavků na spolehlivost (při uvažování zatížení podle původní dokumentace);
- konstrukce byla po celou dobu existence přetížena. Střešní plášť byl těžší, než měl být podle původního stavebního projektu (byly použity dva druhy různých těžkých panelů, na nichž byla vrstva betonu tlustá až 110 mm o objemové hmotnosti až 1 800 kg/m³, pravděpodobně jako nepodařený pokus o lehký beton);
- konstrukce byla nekvalitně vyrobena. Největší závady vykazovaly svarové připoje vazníků (na havárii měly podíl zejména nekvalitně provedené tupé svary dolního taženého pásu vazníků, kde u některých nebylo dosaženo ani 60% předpokládané únosnosti).

Vzhledem ke kumulaci chyb a závad konstrukce (které konstrukce vykazovala po celou dobu používání) byla inicializace porušení už pouze souhrou nepříznivých vlivů. V noci před havárií byly mimořádně nepříznivé klimatické podmínky (děšť se sněhem). Voda nasákla do neizolovaných vrstev betonu na části střechy, kde právě probíhala výměna krytiny, a tím ještě zvýšila přetíženi konstrukce [1].



Obr. 3. Pohled do kotelny po havárii
(v popředí zbytky střešní konstrukce na kotli)

Rekonstrukce sloupů

Po havárii zbyly z konstrukce objektu nad jeřábovou dráhou pouze sloupy a stěny. Prvním krokem rekonstrukčních prací, prováděných souběžně s odstraňováním zřícené konstrukce, byla diagnostika stavu horních dřívků.

Oprava sloupů představovala ve srovnání s novou konstrukcí střechy po technické stránce náročnější část rekonstrukce celé kotelny. Sloupy byly nad úroveň jeřábové dráhy deformovány směrem dovnitř objektu. Přesným zaměřením byly zjištěny deformace od 10 do 450 mm od svislé roviny. Největší plastické deformace byly zjištěny u sloupů, u kterých stál v době havárie mostový jeřáb (působil jako rozpěrný prut mezi sloupy a byl také poškozen). Deformace sloupů byla dvojitá. Prvním tvarem bylo ohnutí podle spojité křivky (většina sloupů v řadě C). Druhým tvarem bylo „zlomení“ sloupu v místě připoje horního pásu jeřábové dráhy (většina sloupů v řadě D). Rozdíl ve tvaru deformace byl způsoben odlišným vyztužením sloupu v místě změny profilu. Sloupy v řadě C byly vyztuženy (obr. 4), sloupy v řadě D nikoli, což



Obr. 4. Tvar sloupů v řadě C

se ukázalo jako konstrukčně nevhodné. Podle původní dílenské dokumentace bylo zjištěno, že sloupy v řadě D kreslil jiný tým konstruktérů než sloupy v řadě C. V místě zlomení sloupů v řadě D bylo zjištěno lokální vyboulení pásnice (vtlačení pásnice do sloupu) a vyboulení stojiny až o 25 mm (obr. 5).



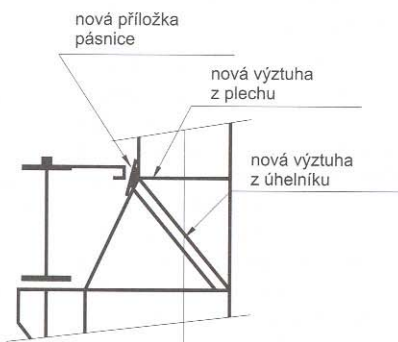
Obr. 5. Lokální deformace sloupů v řadě D

Na základě výsledků měření a podrobné prohlídky konstrukce byly všechny horní části sloupů s celkovou deformací větší než H/100 (uvažováno ohnutí od úrovně jeřábové dráhy, tj. deformace cca 62 mm) a všechny sloupy s výraznými lokálními deformacemi (vyboulení stojiny nebo pásnice o více než 10 mm) nahrazeny novými profily. Zakřivení sloupů o velikosti H/100 bylo při kontrolním přepočtu zahrnuto do statického modelu příčné vazby. Úroveň, od které byly dřívky vyměňovány, je patrná z obr. 4 a obr. 5 (u vyměňovaných dřívků v řadě D byl nový profil vyztužen i v úrovni připoje horního pásu jeřábové dráhy). Konstrukce pod úrovní jeřábové dráhy nevykazovala výrazné deformace způsobené havárií. Vyměňované dřívky jsou svařované profily I s pásnicemi 300 x 20 mm (resp. 300 x 25) a stojinou 800 x 12 mm.

Prvním krokem opravy bylo vybourání zdiva kolem měněných sloupů a přerušení paždíků. Poté byly deformované dřívky odříznuty a na jejich místo přivařeny nové. Po montáži dřívku byly znovu přivařeny paždíky (které jsou součástí podélného rámového ztužení objektu). Vzhledem

k provádění montážních svarů dřívků v zimních podmínkách bylo pracovní místo zakryto a zatepleno. Vyměněna byla třetina z celkového počtu horních dřívků kotelny. Vzhledem k omezené přístupnosti objektu pro montážní mechanismy nebylo možné vyměnit sloup C13, který byl deformován cca o 130 mm (jeřáb k němu nemohl dosáhnout), a proto bylo navrženo „narovnění“ tohoto dřívku. Sloup byl provizorně zajištěn, a poté byla přerušena vnitřní pásnice a cca 2/3 přilehlé stojiny. Hydraulickými lisami byl sloup narovnáván tak, aby se horní hrana dostala do požadované polohy (zakřivený tvar dřívku musel být samozřejmě ponechán a byl eliminován rektifikačními profily nového opláštění). Po srovnání sloupu do požadované polohy byla stojina přelátována příložkami a dodatečnými výztuhami a pásnice zavařena rovněž s přelátováním. Vzhledem k náročnosti opravy byl způsob narovnávání předem vyzkoušen na přístupném sloupu C24.

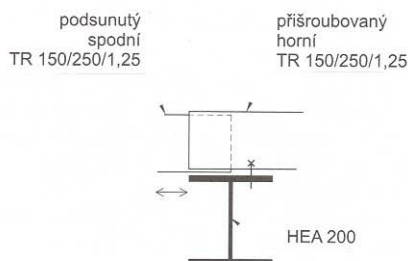
Do všech sloupů v řadě D, které nebyly vyměněny, byly dodatečně vevařeny vodorovné výztuhy v úrovni přípoje horního pasu jeřábové dráhy. Po podrobné prohlídce jednotlivých dřívků a změření lokální deformace byly v případě potřeby ještě přivařeny ke stojině šikmé výztuhy z úhelníků a příložky k pásnici v místě zlomu (obr. 6).



Obr. 6. Oprava sloupu v řadě D v místě přípoje JD

Nová konstrukce střechy

Montáž následovala po rekonstrukci jednotlivých sloupů. Nová střešní konstrukce je řešena jako soustava příhradových vazníků, které jsou uloženy na horních dřících hlavních sloupů. Ve výpočtu bylo uvažováno zakřivení horních dřívků a změna teploty o 50 °C (montáž probíhala za mrazu v prosinci 2002, za trvalého provozu má konstrukce teplotu cca 37 °C). Příhradové vazníky z profilů HEA jsou z oceli S235 a S355.



Obr. 7. Detail posuvného uložení trapezového plechu k hornímu pasu vazníku

Vliv změny teploty na konstrukci v podélném směru objektu byl řešen konstrukčními úpravami (zejména s ohledem na postupnou montáž vazníků a pláště, a tím postupné ohřívání). Vazníky jsou vzájemně spojeny vodorovným a svislým ztužením pouze po dvojicích. Jednotlivé skupiny jsou pak vzájemně vodorovně dilatovány včetně střešního

pláště. Nosnými prvky střešního pláště jsou akustické trapézové plechy 160/250/1,25, které jsou uloženy na horní pásy vazníků (bezvaznicový systém s tuhou deskou z trapézových plechů, které zajišťují horní pásy vazníků proti vybočení z roviny). Plechy jsou pro usnadnění manipulace při montáži řešeny jako prosté nosníky o rozpětí 7,5 m. V místech dilatování skupin vazníků (vždy v každém čtvrtém spoji) je uložení na vazník z jedné strany kluzné (obr. 7). Nový střešní plášť je na rozdíl od původního zateplen (z akustických důvodů je minerální izolace vložena i do vln trapézového plechu). Na vaznících je uprostřed rozpětí osazena konstrukce odvětrávací nástavby, jejíž střecha je tvořena zakružovanými trapézovými plechy TR 40/160/0,88 na tenkostěnných vaznících Z. V bocích nástavby jsou pevné větrací žaluzie. Střecha větrací nástavby není tepelně izolována.

Oprava stěn

Stávající zděný stěnový plášť podélných stěn (západní a východní stěna) byl vybourán až po úroveň jeřábové dráhy a nahrazen skládaným kovovým pláštěm. Na sloupy byly přivařeny úložné rektifikační profily L (vzhledem k deformaci stávajících sloupů až 62 mm byly rektifikační profily nutné), a tím byla stěna opticky srovnána po celé délce. K úložným profilům byly připojeny vodorovné kazety kryté svislým trapézovým plechem, ke kterému se dodatečně připojily vodorovné lamely (v barevném odstínu shodném s navazujícími stěnami). Pro části střechy a stěn u atik a světlíku byly ve velké míře použity tenkostěnné profily ohýbané z pozinkovaného plechu tl. 2 až 4 mm v délce až 8 m.

Severní štítová stěna u řady 25 (původně ocelová konstrukce s pláštěm z trapézových plechů) musela být úplně demontována od úrovně cca +35 m výše a nahrazena novou konstrukcí se skládaným pláštěm z kazet (stávající stěna byla po destrukci střechy vybočena směrem do haly až o 500 mm a do strany až o 400 mm). Zděná jižní stěna zůstala po destrukci střechy a poničení vodorovných výztužných nosníků po výšce stěny nezajištěna proti působení větru, a proto byla alespoň provizorně zajištěna vzpěrami do konzol jeřábové dráhy. V období vyklízení sutin a v počátečním stadiu rekonstrukce ocelové konstrukce nebylo možné stěnu dostatečně zajistit proti vodorovným účinkům větru v plné výši, a tak byla měřena aktuální rychlost větru pro včasnou signalizaci možného nebezpečí (bylo omezeno vodorovné namáhání stěny větrem na 0,15 kN/m², při vyšším tlaku byl zakázán pohyb v oblasti pod stěnou).

Montáž ocelové konstrukce

Montáž nové ocelové konstrukce byla vzhledem k velikosti objektu a jeho nepřístupnosti pro zvedací mechanismy náročná. Rekonstrukce stěn probíhala od úrovně cca +38 m nad terénem, střešní konstrukce je v úrovni cca +45 až +49 m. Objekt délky téměř 190 m byl pro zvedací mechanismy přístupný pouze z obou čelních stěn (v podélném směru ke kotelně přiléhají sousední lodě mezistrojovny se strojovnou, resp. uhelny, a za řadou E jsou pak další technologické objekty). K montáži konstrukce bylo použito několik autojeřábů, největší z nich měl nosnost až 800 t a vyložení 100 m výškově a přes 100 m směrově (při tomto maximálním vyložení měl nosnost cca 2,5 t). Náročnost montáže ještě zvyšovala skutečnost, že po spuštění kotlů se změnilo mikroklima v prostoru nově montované střechy, což se projevilo snížením viditelnosti vlivem nadměrného vývinu páry nad jednotlivými kotly a namrzáním lešení podél stěn.



Obr. 8. Montáž vazníků, vpravo před komínem vyměněný horní dřev sloupu v řadě D

Závěr

Prvořadým úkolem při rekonstrukci kotleny byla minimalizace ztrát z výpadku výroby (dodávky tepla a elektrické energie byly obnoveny již deset dní po havárii). Současně musela být zachována vysoká kvalita díla (kvalitu projektů a stavebních prací průběžně kontrolovali zástupci majitele elektrárny Power International z Velké Británie). Společným úsilím zúčastněných hlavních dodavatelů (EXCON, a. s. – zpracování projektu ocelové konstrukce, diagnostika stávající konstrukce, zajištění dodávky a montáže nové ocelové konstrukce; Chládek & Tintěra, silnice-železnice, Pardubice, a. s. – zajištění stavebních dodávek, bouracích a odklízecích prací; PPP, s. r. o., Pardubice – zpracování projektu stavební části), jejich subdodavatelů a zástupců investora (EOP) bylo realizováno stavební dílo v extrémně krátkých lhůtách výstavby v rozsahu 270 t ocelových konstrukcí, 5 200 m² střechy, 3 600 m² stěn. Rychlost rekonstrukčních prací nebyla v žádném případě na úkor kvality odevzdaného díla. Rekonstrukce kotleny v EOP byla pro všechny zúčastněné obrovskou zkušeností, která se jistě vzhledem k technickému stavu podobných konstrukcí stejného stáří uplatní i v budoucnosti.



Obr. 9. Pohled do rekonstruované kotleny z kotle č. 4

Literatura

- [1] Háša, P. – Jeřábek, L. – Rosenkranz, B. – Vašek, M.: K příčinám havárie ocelové konstrukce střechy kotleny Elektrárny Opatovice nad Labem. Konstrukce, 1/2004.

Vácha, J. – Háša, P.: Repair of the Crashed Roof Structure of a Boiler Room in the Opatovice Power Plant

The breakdown of a boiler room caused by the crashed roof put the power plant out of operation immediately. The accident affected hundreds of thousands of inhabitants of the Pardubice and Hradec Králové regions. Beside power generation, the power station provides heat supply for Pardubice, Hradec Králové and the adjacent smaller towns. The operation disruption of this heat source was a serious problem for a large part of East Bohemia in the early November of 2002. Immediately after the crash, three independently operating expert teams began to investigate its causes. (One team led police investigations, the second examined the case for the insurance company, and the third one worked on the investor's request.) Irrespective of the examination done by the teams looking for the accident causes, the reconstruction of the power plant was commenced.

Vácha, J. – Háša, P.: Reparatur einer eingestürzten Dachkonstruktion im Kraftwerk Opatovice

Die durch den Einsturz des Daches bewirkte Havarie einer Kesselanlage setzte das Kraftwerk Opatovice außer Betrieb, was sich sehr ungünstig für die Bewohner der Kreise Pardubice und Hradec Králové auswirkte. Das Kraftwerk dient außer zur Energieerzeugung als Wärmeerzeuger für Pardubice, Hradec Králové und die umliegenden kleineren Städte. Und gerade die Außerbetriebsetzung der Wärmeerzeuger bedeutete zu Anfang November 2002 ein ernstes Problem für einen großen Teil Ostböhmens. Augenblicklich nach der Havarie begannen drei unabhängige Expertengruppen (eine arbeitete im Rahmen der polizeilichen Untersuchung, die zweite im Rahmen der Untersuchung seitens der Versicherung und die dritte auf Verlangen des Bauherrn) deren Ursachen zu untersuchen. Unabhängig von der Tätigkeit der die Ursachen der Havarie untersuchenden Gruppen wurde die Rekonstruktion des Objektes begonnen.

Tradice Rochlových stavebních tabulek pokračuje

Pražské nakladatelství INCON-F připravilo další vydání Nových Rochlových stavebních tabulek. Jde tentokrát o podstatně rozšířené druhé vydání druhého dílu. Stavební tabulky v obvyklé červenočerné vazbě navazují na tradici tabulek docenta Rochly, které patřily, a dosud leckde patří, k nepostradatelným odborným publikacím ve stavební branži.

V nové edici bylo od roku 1997 vydáno pět dílů, některé z nich po doplnění již podruhé. Každý ze svazků je věnován několika vybraným skupinám výrobků a obsahuje kromě množství technických údajů a výkresů také seznamy souvisejících českých a evropských norem a praktické přepočtové tabulky fyzikálních jednotek. Tabulky slouží také jako pomocné učební texty – každá kapitola totiž obsahuje úvod do dané problematiky od předních odborníků z pražských i brněnských vysokých škol.

www.rochlovy-stavebni-tabulky.cz