# VÝZVY PŘI NUMERICKÉM MODELOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH PANELŮ ZATÍŽENÍCH VÝBUCHEM

Vojtěch Šulc, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika. vojtech.sulc@fsv.cvut.cz

#### ABSTRAKT

Předmětem článku je představení vybraných výzev při numerickém modelování kompozitních panelů ocel-beton. Celý článek je součástí probíhajícího experimentálního programu zabývajícího se charakterizací chování spřažených kompozitních konstrukcí ocel-beton vystavených zatížení kontaktním výbuchem. Součástí experimentu jsou 2 sady materiálově různých vzorků po 6 odlišných konfiguracích vyztužení, resp. spřažení. Panely byly po obvodě podepřeny a uprostřed zatíženy. V článku jsou diskutovány způsoby, jak lze modelovat zatížení výbuchem. Mezi základní možnosti, které jsou pro modelování výbuchu vhodné řadíme použití náhradního zatížení (LOAD\_BLAST\_ENHANCED), náhrady výbušniny pevnými částicemi (SPH) nebo komplexní modelování jak výbušniny, zatěžované konstrukce, tak okolního prostředí (ALE). Dalším důležitým faktorem u numerického modelování kompozitních konstrukcí je správná definice kontaktu na rozhraní jednotlivých materiálů. V našem případě bylo použito několik odlišných definic kontaktu. V článku jsou popsány jednotlivé faktory ovlivňující celkový výsledek výpočtů a následně jsou nastíněny další výzkumné cíle.

#### KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Ocel • Kompozit • Výbuch • Modelování

## ABSTRACT

The subject of this paper is to present selected issues in numerical modelling of steel-concrete composite panels. This paper is part of an ongoing experimental program focused on characterization of behavior of steel-concrete composite structures subjected to contact blast loading. The experiment includes 2 sets of specimens differing in the used type of concrete, of 6 different reinforcement and coupling configurations, respectively. The panels were supported at the edges of the soffit and loaded in the middle. The paper discusses how blast loading can be modelled. Some of the basic options that are suitable for blast modelling include the use of supplementary loading (LOAD\_BLAST\_ENHANCED), solid particle replacement of the explosive (SPH) or the most comprehensive modelling of both the explosive, the loaded structure and the surrounding environment (ALE). Another important factor in numerical modelling of composite structures is the correct definition of

\* Školitel: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.

the interface of the materials. In our case, several different contact definitions were used. In this paper, the different factors influencing the overall result of the calculations are described and then further research objectives are outlined.

#### **KEYWORDS**

Blast · Composite · Concrete · Modelling · Steel

# 1. POPIS EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAMU

V rámci experimentu bylo zkoumáno celkem 6 různých betonových panelů ve dvou variantách betonu. V první sadě byl použit běžný beton. V druhé sadě byly zkoumány prvky stejně uspořádány, ale byly zkoušeny prvky z UHPFRC.

Jedná se o sady betonových panelů s různými vlastnostmi. Odlišují se různými konfiguracemi umístění ocelových desek i různými spřahujícími prostředky, resp. v některých případech hustotou jejich použití.

Všechny varianty vzorků jsou uvedeny v Tabulce 1. Tabulka 1 – Přehled všech zkoumaných vzorků z betonu běžné pevnosti

Označení vzorku	Popis vzorků
1.0	Beton vyztužen sítí Ø8/150/150, krytí 30 mm
1.1	Prostý beton se spodní ocelovou deskou tl. 10
	mm, spřažení pomocí 4 trnů Ø10/100 v rozích
1.2	Prostý beton se spodní i horní ocelovou
	deskou tl. 10 mm, spojení pomocí 4 závito-
	vých tyčí M10 v rozích
1.3	Prostý beton se spodní i horní ocelovou
	deskou tl. 10 mm, spojení pomocí 24 závito-
	vých tyčí M10
1.4	Beton vyztužen sítí Ø8/150/150 uprostřed
	výšky, spodní ocelová deska tl. 10 mm, spřa-
	žení pomocí 24 trnů Ø10/100
1.5	Beton vyztužen sítí Ø8/150/150 uprostřed
	výšky, spodní ocelová deska tl. 10 mm, spřa-
	žení pomocí 6 spřahovacích lišt tl. 5 mm

Prvky z betonu běžné pevnosti byly zhotoveny z betonu C30/37 XF2 (F.1.1) S4 Dmax16 CEM I 42,5 R Cl 0,2.

Všechny vzorky byly betonovány v Kloknerově ústavu ČVUT. Pro kontaktní výbuch bylo použito u všech vzorků 0,5kg Semtexu 1A.

Rozměry všech vzorků jsou shodně 1,0x1,0x0,15 m. Právě volba rozměrů panelů a hmotnost nálože je zásadní. Napříč škálou zkoumaných vzorků se nachází diametrálně odlišně odolné vzorky (např.: velmi odolný vzorek 1.5, respektive většina prvků z UHPFRC, oproti tomu křehký vzorek 1.0). Zároveň bylo nutné zvolit velikost prvků takovou, aby na jeho ploše bylo možné realizovat určitou reálné možnosti spřažení podle normových požadavků.

Porovnání vlivu zmiňovaných různých druhů spřažení bylo jedním z cílů experimentu.

Na Obrázek *I* je patrný panel před výbuchem. Na jeho povrchu je umístěna výbušnina. Po stranách jsou patrné manipulační úchyty. Panel je usazen na svařené ocelové stolici. Tato ocelová stolice byla uložena vždy na dvojici betonových panelů. Pod panelem jsou umístěny kolimátory pro měření PDV. Experiment byl uspořádán na Univerzitě Pardubice za spolupráce se zaměstnanci Ústavu energetických materiálů.



Obrázek 1 – Umístění vzorku před výbuchem

V rámci experimentu byla měřena rychlost spodního povrchu vzorků během odezvy na zatížení výbuchem.

Dále bylo provedeno vyšetření panelů ultrazvukem před a po výbuchu. To bylo učiněno v rastru 200x200 mm. Bohužel u některých vzorků došlo ke kompletní delaminaci vrstev a při měření ultrazvukem nebyly naměřeny žádné hodnoty.



Obrázek 2 – Poškození vzorků 1.1, 1.4 a 1.5 na jejich horním povrchu

Detailnějším popisem uskutečněného experimentu se zabývá předchozí článek (Šulc V., 2023).

### 2. POPIS MODELU

Za účelem pochopení probíhajících fenoménů byly vytvořeny výpočetní modely v softwaru LS-DYNA, což je široce využívaný konečně-prvkový software pro modelování vysokorychlostních jevů využívající metody explicitní dynamiky. Panely byly modelovány objemovými prvky, a to včetně ocelových

desek, spřahovacích trnů, lišt i betonářské výztuže. V některých zahraničních publikacích jsou na modelování ocelových desek podobných konstrukcí využívány plošné prvky typu SHELL. K tomuto způsobu modelování ocelových desek je dle názoru autora článku možné přistoupit v případě, že se jedná o relativně tenké desky (jednotky mm), které byly v zahraničních publikacích využity. V případě řešených prvků se jedná o ocelové desky tloušťky 10 mm. U tyčových prvků, typicky u betonářské výztuže je možné použít prutové prvků typu BEAM. V řešeném případě byla volena možnost modelování všech částí konstrukce panelu objemovými prvky v jedné síti konečných prvků o stejné hraně krychle délky nejprve 5 mm. Tato síť byla v průběhu prací na výpočetních modelech zjemněna na síť o velikosti 2 mm. Tím samozřejmě došlo k prodloužení výpočetního času.

Každému objemovému prvku je ve výpočetním softwaru přiřazen materiálový model potažmo další vlastnosti jako např. příslušná stavová rovnice (Equation of state = EOS). Ve výzkumném týmu panovala shoda s použitím materiálového modelu MAT\_159\_CSCM\_CONCRETE pro beton, jelikož s ním do té doby byly téměř vždy dobré zkušenosti. Tento materiálový model má velkou výhodu v tom, že ve výpočetním softwaru LS-DYNA existují 2 jeho varianty. Do jednoduší varianty je potřeba zadat jako vstup pouze základní parametry jako objemovou tíhu, tlakovou pevnost a maximální zrno kameniva. Na základě těchto údajů dojde na pozadí softwaru k dopočítání ostatních charakteristik. Složitější varianta obsahuje právě tyto na pozadí dopočítávané charakteristiky, které je tedy možno ručně upravovat. Zároveň je možné si na základě jednoduššího modelu vygenerovat všechny potřebné charakteristiky a následně je použít jako vstup pro komplexní model v případě, že je potřeba upravit jen některé jednotlivé charakteristiky. Zvažován byl také materiálový model MAT72\_REL3 u kterého však není jednoduché definovat všechny vstupy. (LS-DYNA - Keyword User's Manual - Volume I, 2021)

Model je po obvodě podepřený podporami působícími pouze v tlaku, které by měly reprezentovat podepření ocelovou stolicí. V průběhu experimentu byla pomocí metody PDV měřena rychlost 4 bodů spodního povrchu každého panelu. Rychlosti získané z výpočetního numerického modelu zatím nedosahují takových rychlostí, jako byly rychlosti naměřené při experimentu. To může pramenit z toho, že při výbuchu došlo k zatlačení zkušebního ústrojí sestávající ze zkoušeného vzorku, ocelové stolice a betonových panelů pod stolicí do zeminy. Zároveň je dost dobře možné, že při výbuchu došlo k deformaci samotné ocelové stolice. Do budoucna je tak možné provést zpřesnění výpočtu tím, že dojde k domodelování ocelové stolice s pružným podepřením v její patě.

Vzhledem k husté síti konečných prvků a symetričnosti většiny vzorků bylo přistoupeno ke zjednodušení ve formě modelování pouze ¼ panelu při definování příslušných okrajových podmínek na plochách symetrie. V případě modelování celého panelu se sítí konečných prvků 2 mm měl vstupní soubor modelu velikost více než 3 GB a počet řádků vstupního textového souboru ve formátu ".k" přesahoval 38 milionů. Po vymeshování nodů a elementů za pomocí programu MATLAB a následném vytvoření vstupního souboru se nepovedlo tento vstupní soubor ani otevřít ke kontrole v LS-Dyna PrePost procesoru.

V současné době stále probíhá validace výpočetních modelů.

# 3. MODELOVÁNÍ VÝBUCHU

Pro modelování výbuchu jsou možné v zásadě 3 cesty, kterými se lze vydat. Nejjednodušší způsob je implementace zatížení výbuchem do numerického modelu pomocí ekvivalentního zatížení (LBE). Pokročilejším a zároveň i výpočetně náročnější je použití hmotných bodů reprezentující letící částice, resp. účinek výbušniny (SPH). Nejsložitějším je pak modelování zatížení výbuchem včetně modelování okolního prostředí (ALE). V následujících kapitolách jsou jednotlivé způsoby rozebrány. Různými způsoby modelování výbuchu se zabývá publikace (Zahra, 2012).

Ve výstupech z výpočetního softwaru je zobrazována veličina effective plastic strain reprezentující plastické přetvoření zobrazovaného povrchu. Při dosažení hodnoty 1,0 této veličiny dochází k erozi daného elementu.

#### 3.1. LOAD\_BLAST\_ENHANCED (LBE)

Metoda zatížení výbuchem LOAD\_BLAST\_ENHANCED spočívá v nahrazení zatížení výbuchem náhradním zatížením vycházející z průběhu přetlaku na čele rázové vlny. Tento způsob je jednoznačně nejméně výpočetně náročný. Jako vstup pro toto zatížení stačí ekvivalentní hmotnost TNT a poloha výbušniny. Zároveň je díky své podstatě doporučován pro vzdálenější výbuchy než kontaktní výbuch. Tento způsob modelování výbuchu byl využit právě pro svoji jednoduchost a nenáročnost, při znalosti jeho limit.



Obrázek 3 – Vzorek 1.1, LBE, čas 2,5 ms, effective plastic strain

Na Obrázku 3 jsou vidět výsledky vzorku 1.1 při použití LBE. Zde dochází k relativně dobré shodě s výsledky experimentu. V reálu došlo u tohoto vzorku k vytvoření 1 hlavní trhliny ze středu vzorku k jeho rohu, kde byl umístěn spřahovací trn. Tato trhlina je patrná i na výsledcích z výpočetního modelu.



# Obrázek 4 – Vzorek 1.5, LBE, čas 2,5 ms, effective plastic strain

U vzorku 1.5 došlo k vytvoření ortogonálního trhlinového systému zapříčiněného přítomností ortogonálních spřahovacích lišt. Ve výpočetním modelu ve stejném čase jako u vzorku 1.1. je systém těchto trhlin patrný.



Obrázek 5 – Vzorek 1.2, LBE, čas 1,3 ms, effective plastic strain (pohled na beton)

Na Obrázku 4 jsou uvedeny výsledky pro vzorek 1.2, tedy vzorek s horní i spodní ocelovou deskou spojenou 4 svorníky v rozích. V reálu došlo u všech vzorků s horní ocelovou deskou k výraznému promáčknutí ocelové desky do betonu. V žádném výpočetním modelu za použití LBE k tomuto jevu nedošlo a obecně nedošlo k výraznému namáhání potažmo eroze betonu.

Obecně lze z této zkušenosti říct, že většina vzorků bez horní ocelové desky se chovala se zatížením LBE v relativní shodě s experimentem a lze prohlásit, že je možné toto zjednodušení zatížení použít. Pro vzorky s obsahující i horní ocelovou desku je však nutné hledat vhodnější způsoby modelování.

#### 3.2. Smoothed Particle Hydtodynamics (SPH)

V metodě Smoothed Particle Hydtodynamics (SPH) dochází k diskretizaci hmotnosti výbušniny do hmotných bodů. Ty je možné vygenerovat přímo ve výpočetním softwaru LS-DYNA pomocí integrovaného generátoru. V rámci výpočetního softwaru je hmotných bodům přisuzována daná hmotnost, dále dochází k definování bodu detonace. Je nutné nadefinovat kontakt mezi elementy na povrchu vystaveném výbuchu a částicemi SPH. V případě nenadefinování tohoto kontaktu dojde k vzájemnému průniku těchto částic a objemových prvků bez jakékoliv interakce. U definice tohoto kontaktu by teoreticky mohl pramenit problém této definice kontaktu. V případě použití této definice výbuchu u vzorků bez horní ocelové desky by mohlo dojít k oderodování horní vrstvy objemových prvků betonu, s kterými byl kontakt svázán a dále by pak mohlo dojít k prolétnutí SPH částic skrze nižší vrstvy vzorku.

Zároveň u některých vzorků začalo docházet k pádům výpočtu z důvodu nestability.



Obrázek 6 – Vzorek 1.2, SPH

Na Obrázku 6 je světle modře zobrazen válec z hmotných bodů reprezentující výbušninu.



Obrázek 7 – Vzorek 1.2, SPH, čas 2,5 ms, effective plastic strain (pohled na ocel)

Na Obrázku 7 jsou zobrazeny výsledky plastického přetvoření při zapnutí obou materiálů. Na horním povrchu je tak zobrazována ocelová deska, na které je zjevně patrné výrazné promáčknutí korespondující s promáčknutím při experimentu.



Obrázek 8 - Vzorek 1.2 po experimentu po sundání horní ocel. desky

Ve výpočetním modelu dochází i ke značnému namáhání betonové části panelu, ke které docházelo i při experimentu, což je patrné z Obrázku 8. Konkrétně u tohoto panelu došlo k velmi podobnému poškození jako u vzorku 1.1, tedy stejnému vzorku akorát bez horní desky (dominantní poškození od středu k místu spřahovacího prostředku, následný radiální systém trhlin).

Při použití definice výbuchu pomocí SPH dochází k nezanedbatelnému nárůstu výpočetního času,

Obecně lze prohlásit, že definice výbuchu pomocí SPH samotný výbuch lépe vystihuje a dle názoru autora tohoto textu je vhodné ho používat v případech, kde to možné je a zároveň kde by použití této definice výbuchu nemohla vyvolat problémy.

#### 3.3. Arbitrary Lagrangian-Eulerian metoda (ALE)

Obecně jde o nejkomplexnější definici výbuchu spočívající v definování mimo vzorek a výbušninu i okolní prostředí, za účelem vytvoření prostředí pro tlakovou vlnu, kudy se může šířit. Pro vytvoření okolního prostředí je nutné vytvořit duplicitní síť konečných prvků, jednu pro vzorek a druhou pro okolní prostředí. Vzduch a výbušnina jsou definovány Eulerovským principem, v jehož rámci dochází ke změně velikosti jednotlivých konečných prvků. Zkoušený vzorek je definován klasickým Lagrangianským principem.



Obrázek 9 – Lagrangianský a Eulerovský princip sítě (CHENG D-C et al., 2013)

V této fází prací na projektu nebylo z důvodu nadměrné výpočetní náročnosti přistoupeno k modelování okolního prostředí pomocí představeného způsobu.

# 4. MODELOVÁNÍ ROZHRANÍ MATERIÁLŮ

Definice vhodného kontaktu na rozhraní různých materiálů je v případě kompozitních konstrukcí téměř tak důležitá jako definice samotných materiálových modelů. Kontakt na rozhraní reprezentuje vzájemné působení obou částí prvku. Touto problematikou se zabývá např (Modeling of Composites in LS-DYNA, 2012) a (Introduction to Composites Modelling in LS-DYNA, 2019).

#### 4.1. Plné vetknutí

V první fázi modelování došlo ve výzkumné týmu ke shodě, že bude nejlepší začít s modelem reprezentující plné vetknutí. To je provedeno tak, že celý panel je vymeshován v 1 síti konečných prvků. Na rozhraní ocelové desky a betonu sousedí vždy element ocelové desky a betonu. Tyto sousední elementy mají společné uzly a jsou do sebe tedy plně vetknuty. K porušení vetknutí dochází až ve chvíli, kdy dojde k erozi elementu na tomto rozhraní. Tento typ spojení je tedy v této variantě jak mezi deskami a betonem, tak mezi svorníky, spřahovacími trny, lištami i betonářskou výztuží a betonem.

V tomto případě podle názoru autora díky dokonalému obalení těchto výztužných potažmo spřahovacích prostředků je tento způsob modelování jejich vzájemného rozhraní správný.

U všech zobrazených vzorků bez horní ocelové desky bylo použito toto řešení. Při absenci horní ocelové desky by nemělo být chybné použít toto řešení.

Problém nastává u vzorků s horní ocelovou deskou, kdy při experimentu docházelo při zatížení výbuchem mimo jiné ke vzniku tahového namáhání na horních vláknech a následně k potrhání betonu na tomto povrchu. K tomu však nemůže dost dobře dojít v případě namodelování rozhraní ocel-beton podle výše popsaného způsobu. V něm totiž nemůže dost dobře dojít ke vzniku tahových napětí na mezi tahové pevnosti betonu z důvodu pevného vetknutí betonové vrstvy do ocelové a tahy na tomto povrchu tak z velké míry zachycuje ocelová deska.

Z výše uvedených důvodů bylo nutné se pokusit oblast na rozhraní ocelové desky a betonu řešit vhodnějším způsobem.

Všechny numerické simulace uváděné dále v textu byly prováděny zejména na vzorku 1.2, který představuje přechod mezi vzorky bez horní a s horní ocelovou deskou.

#### 4.2. Fiktivní vrstva

Jedním z řešení uvedených problémů plně vetknutých modelů se nám jevilo vymodelování fiktivní smykově kluzné, resp. smykově velmi měkké vrstvy pod ocelovou deskou. Tato vrstva byla modelována na výšku 1 konečného prvku, tedy 2 mm. Na tuto vrstvu byl použit komplexně zadávaný materiál MAT\_159\_CSCM\_CONCRETE, u kterého byly zachovány všechny charakteristiky až na smykový modul, který byl u této vrstvy předepsán na 1 GPa.



Obrázek 10 – Vzorek 1.2, LBE, použití fiktivní vrstvy, čas 1,3 ms, effective plastic strain (pohled na beton)

Jak je patrné z Obrázku 10, použití fiktivní kluzné vrstvy nepřineslo kýžený výsledek, ve formě trhlin na horním povrchu betonu.

#### 4.3. Definice kontaktu

Další možností, jak definovat chování vzorku na rozhraní materiálů je pomocí definice specifických kontaktů. V rámci nabídky obsažené přímo v LS Dyna je možné použít rozmanitou škálu kontaktů. Pro nadefinování kontaktu je však nutné mít nadefinovanou konstrukci v oddělených konečných sítích. Elementy na rozhraní ocelové desky a betonu již nemohou mít společné uzly. Z tohoto důvodu bylo nutné všechny výpočetní modely přemeshovat tak, aby byla v jedné síti spodní a horní ocelová deska spolu se svorníky a v druhé síti jen betonová část konstrukce. Pak je nutné nadefinovat kontakty na rozhraní horní desky, ale i na rozhraní spodní desky a zároveň i na povrchu spřahovacího trnu. Kontakty lze obecně rozdělit na automatické a manuální. U automatických kontaktů dochází k definování kontaktů v průběhu výpočtu. U manuálních kontaktů jsou nadefinované skupiny elementů, mezi kterými daný kontakt platí. Bohužel při zatížení kontaktním výbuchem jsou

probíhající jevy tak rychlé, že při použití automatického kontaktu dojde k průniku ocelové desky do betonu viz Obrázek 11.



Obrázek 11 – Vzorek 1.2, LBE, kontakt Automatic\_surface\_to\_surface

Bohužel k tomuto jevu v případě takto rychlých jevů nedochází jen u automaticky generovaných kontaktů, ale i u kontaktů z druhé skupiny.

Nejprve se jevil vhodně kontakt SLIDING\_ONLY, který by umožňoval vzájemný pokluz vrstev mezi sebou při současném přenosu tlakového namáhání. Tento kontakt měl potenciál relativně dobře simulovat styk mezi hladkou ocelovou deskou s nabetonovaným panelem, který při řídkém osazení spřahovacích prostředků nebyl po celé své ploše vetknutý do ocel. desky. Bohužel u tohoto kontaktu došlo rovněž k průniku ocelové desky do betonu. V tomto případě by mohlo být řešením změna velikosti sítě potažmo časového kroku.

Jako použitelný se nakonec jevil manuálně definovaný kontakt SURFACE\_TO\_SURFACE. U automatické verze tohoto kontaktu bohužel docházelo k průniku ocelové desky do betonu. Tento problém však nenastával u manuálně definované verze.





Tendence poškození tohoto vzorku na výstupech z výpočetního modelu korespondovala s realitou pozorovanou v experimentu. V modelu totiž dochází ke vzniku namáhání v diagonálním směru od středu panelu spolu s bezprostředním namáhání pod výbušninou ve středu panelu. Tento charakter poškození byl pozorován v reálu. V rámci definice kontaktu SURFACE\_TO\_SURFACE je možné definovat statický ( $f_s$ ) i dynamický ( $f_d$ ) součinitel tření. Na Obrázku 12 jsou zobrazeny 2 varianty nastavení součinitelů tření u stejného výpočetního modelu z kterých je jasně patrné, že jejich volba má výrazný vliv na výsledky.



Obrázek 13 – Vzorek 1.2, SPH, čas 2,6 ms, kontakt Surface\_to\_surface, effective plastic strain; nahoře:  $f_s=f_d=1$ ; dole:  $f_s=f_d=10$  (pohled na beton)

# 5. ZÁVĚR

Článek popisuje probíhající experimentální program zabývající se popisem chování spřažených konstrukcí ocel-beton vystavených zatížení výbuchem. Cílem článku bylo přiblížit čtenáři výzvy, se kterými je nutné se vypořádat při numerickém modelování kompozitních konstrukcí zatížených kontaktním výbuchem. Je potřeba vyřešit vhodný způsob modelování samotného zatížení výbuchem. V tomto ohledu je nezbytné zahrnout do úvah při tvorbě výpočetního modelu i výpočetní náročnost, která se u různých definic zatížení výbuchem značně liší. Zároveň je nutné důsledně věnovat pozornost namodelovanému styku na rozhraní materiálů, kdy je cílem, aby se tato oblast chovala co nejblíže skutečnosti. Dá se jednoznačně prohlásit, že oba tyto elementy mají významný vliv na výsledky výpočtu. V další fázi prací budou provedeny výpočty s nadefinovaným kontaktem na rozhraní materiálu i u ostatních vzorků spolu s definicí výbuchu SPH.

# ACKNOWLEDGEMENTS

Tento příspěvek vznikl za podpory GAČR 22-33039S a SGS24/039/OHK1/1T/11.

# Reference

ŠULC, Vojtěch. Vliv druhu spřažení na odolnost ocelobetonových panelů vystavených účinkům výbuchu. In: HORÁKOVÁ, Anna a PETŘÍK, Martin (ed.). Proceedings of PhD Workshop. 26.5.2023. Praha: Czech Technical University in Prague, 2023, s. 70-76. ISBN 978-80-01-07137-3. Dostupné také z: https://concrete.fsv.cvut.cz/phdworkshop/proceedings/2023/pdf/Sulc\_Vojtech.pdf.

- LS-DYNA Keyword User's Manual Volume I. Online. Livermore, California: Livermore Software Technology (LST), An Ansys Company, 2021. Dostupné z: https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna\_manual\_volume\_i\_r13.pdf/view. [cit. 2024-03-30].
- ZAHRA, S. Tabatabaei a JEFFERY, S. Volz. A Comparison between Three Different Blast Methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE. Online. In: 12th International LS-DYNA Users Conference. Detroit, 2012. Dostupné z: https://www.dynalook.com/conferences/12th-international-ls-dyna-conference/blast-impact20-d.pdf. [cit. 2024-03-30].
- CHENG, Ding-Shing; HUNG, Cheng-Wei a PI, Sheng-Jung. Numerical Simulation of Near-Field Explosion. Journal of Applied Science and Engineering. 2013, roč. 16, s. 61-67.
- Modeling of Composites in LS-DYNA. Online. In: . Livermore Software Technology Corporation, 2012. Dostupné z: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/composites/mat\_comp.pdf. [cit. 2024-03-31].
- Introduction to Composites Modelling in LS-DYNA. Online. In: The Arup Campus Blythe Gate, United Kingdom: Oasys Ltd, The Software House od ARUP, 2019. Dostupné z: https://www.oasys-software.com/dyna/wp-content/uploads/2019/03/6\_Composites\_Modelling\_LS-DYNA\_Galal-Mohamed-IN.pdf. [cit. 2024-03-31].