



**ÚSTAV
TECHNICKÉ
A EXPERIMENTÁLNÍ
FYZIKY ČVUT V PRAZE**

Funkční vzorek

Zkušební přístroj pro simultánní měření pevnosti v ohybu a analýzu vnitřní struktury metodou 4D rentgenové mikro-tomografie

Autoři:

Ing. Jan Dudák, Ph.D.

Ing. Ondřej Pavlas

Ing. Veronika Tymlová

Ing. Jan Žemlička, Ph.D.

Ústav technické a experimentální fyziky

České vysoké učení technické v Praze

Interní označení: LVV-01

Rok: 2025

Obsah

Úvod	2
Vlastní popis funkčního vzorku	2
Technická specifikace	3
Ověření funkčnosti	5
Ekonomické ukazatele	7
Využití výsledku	7
Vlastník	7
Kategorie podle nákladů	8
Licence	8
Dedikace	8
Webové stránky	8
Přílohy	8

Úvod

Funkční vzorek LVV-01 je zařízení určeného pro analýzu mechanických vlastností voskových vzorků pomocí tříbodového ohybu s možností současného snímání testovaného vzorku zobrazovacím RTG svazkem, který umožňuje sledovat rozvoj strukturálních defektů ve vzorku. Zařízení bylo navrženo tak, že jeho parametry vyhovují normě ČSN EN ISO 178 (ohybové vlastnosti tuhých a polotuhých plastů) a zároveň je kompatibilní s RTG mikro-CT systémem provozovaným v zobrazovací laboratoři ÚTEF ČVUT.

Vlastní popis funkčního vzorku

LVV-01 (lamačka voskových vzorků) je funkční vzorek zařízení navrženého za účelem posuzování vlivu konsolidace na mechanické vlastnosti vzorků vosku v rámci projektu DH23P03OVV038 Metody konsolidace křehkých pórovitých voskových pečetí financovaném programem NAKI III. Testování mechanických vlastností probíhá tříbodovým ohybem a jeho výstupem je křivka závislosti napětí vzorku na jeho deformaci. Celé zařízení bylo navrženo zejména s ohledem na tři požadavky:

1. Parametry testu tříbodových ohybem odpovídají normě ČSN EN ISO 178, která stanovuje metodiku a podmínky pro zjišťování ohybových vlastností tuhých a polotuhých plastů.
2. Celé zařízení je kompatibilní s RTG mikro-CT systémem provozovaným v radiografické laboratoři ÚTEF ČVUT.
3. Testovací komora je vybavena elektronickým teplotním čidlem, které zajišťuje stabilní a opakovatelné podmínky měření, neboť mechanické vlastnosti vosků jsou silně závislé na jejich teplotě.

Unikátnost vyvinutého zařízení spočívá zejména v možnosti v rámci tříbodového ohybu zaznamenat napětově-deformační charakteristiku vzorku a současně prostřednictvím RTG svazku sledovat vznik a rozvoj strukturálních defektů.

Konstrukce LVV-01 je navržena jako kombinace 3D tištěných dílů z odolného materiálu ASA, plexiskla a lineárních kuličkových vedení. S přihlédnutím k předpokládanému využití na testování vzorků vosku, kde se očekává působení sil v řádu jednotek Newtonů, je konstrukce založená na využití 3D tištěných dílů dostatečně tuhá. Maximální síla, pro kterou byla konstrukce navržena, je 50 N.

Technická specifikace

LVV-01 se skládá ze tří základních částí (viz Obrázek 1):

1. Zatěžovací jednotka

Zatěžovací jednotka je komplexním konstrukčním prvkem, který zajišťuje zatěžování vzorku a současně zaznamenává napětí vzorku v závislosti na jeho průhybu. Skládá se ze tří 3D tištěných částí vzájemně propojených ocelovými tyčemi, které slouží jako lineární vedení zatěžovacího trnu. Trn je poháněn prostřednictvím trapézové závitové tyče pomocí krokového motoru Microcon SX16-0503 (Obrázek 2 A). Zatěžovací trn je dále vybaven tenzometrickým snímačem HT Sensor TAS501N a teplotním čidlem ADT7410 (Obrázek 2 B). Tlakový senzor dovoluje měření zatížení vzorku do síly 50N při přesnosti 0.025N. Teplotní snímač poskytuje informaci o teplotě uvnitř klece s přesností 0.4 °C.

2. Základna

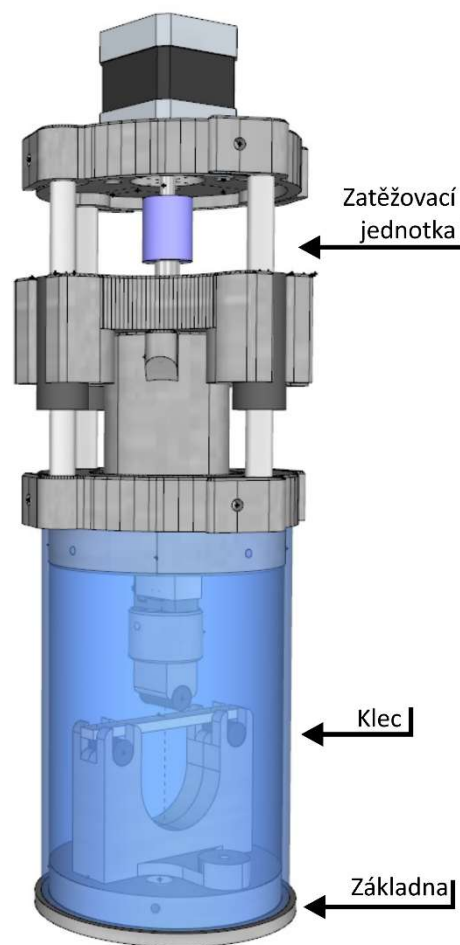
Základna se skládá z montážní desky a vyměnitelných podstavců pro vzorky (Obrázek 2 C). Montážní deska je navržena tak, aby byla kompatibilní s rotačním stolem Newport URS75BPP, který slouží pro manipulaci se vzorky v RTG svazku mikro-CT systému v laboratoři ÚTEF ČVUT.

3. Klec

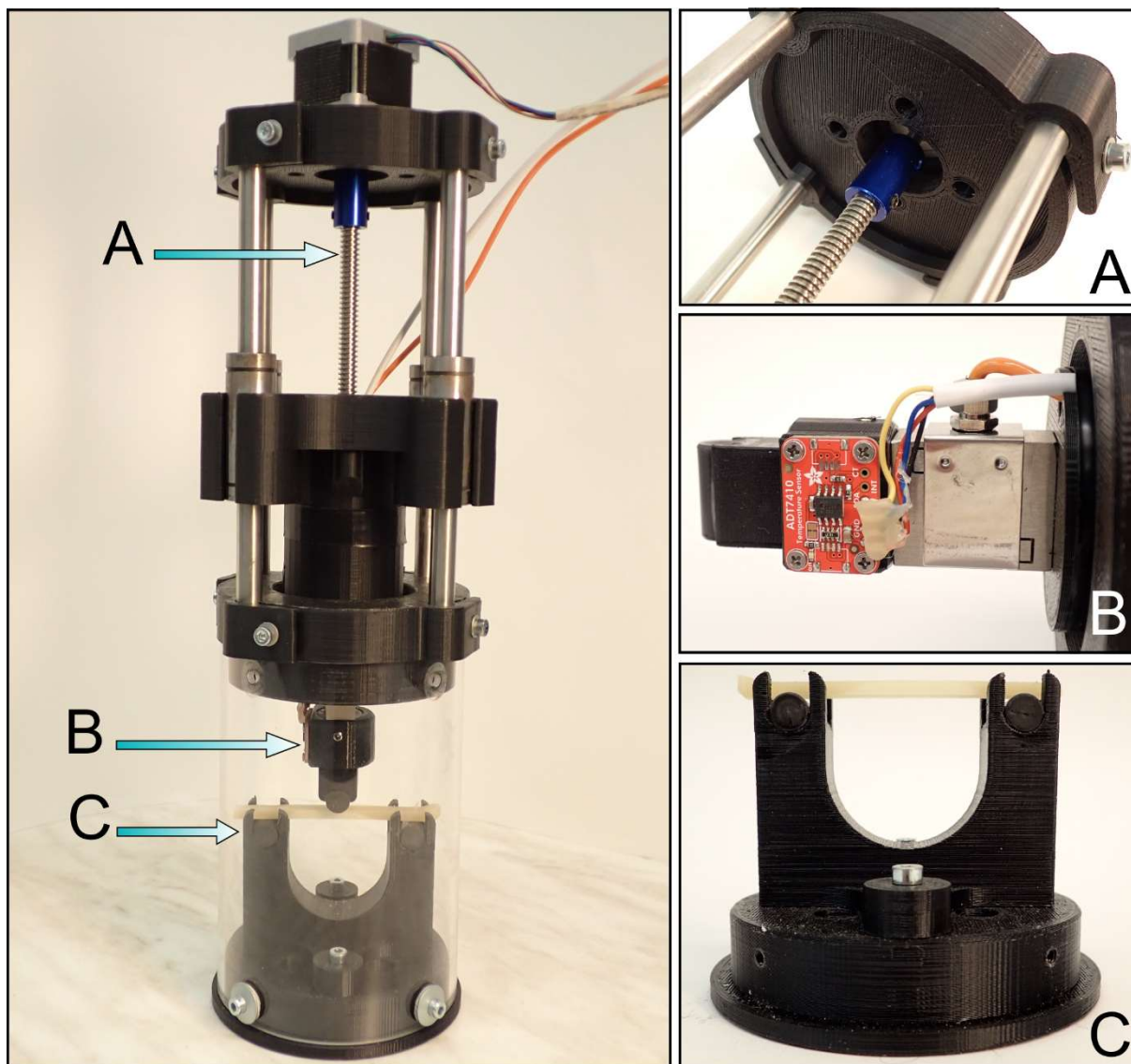
Klec je tvořena plexisklovým válcem o průměru 100 mm s tloušťkou stěny 3 mm. Zprostředkovává mechanické spojení mezi základnou a zatěžovací jednotkou. Díky volbě materiálu, svým rozměrům a rotační symetrii klec umožňuje provádění mikro-CT skenů vzorku umístěného v LVV-01 bez vzniku nežádoucích obrazových artefaktů.

Samotné kontaktní plochy zatěžovacího trnu a podstavce vzorku nejsou 3D tištěné, ale jsou vyhotoveny z karbonové kulatiny o průměru 10 mm. Díky tomu vyhovují jak výše zmíněné normě ČSN EN ISO 178, tak i požadavkům RTG snímání.

LVV-01 byl navržen pro testování vzorků vosku, nicméně zařízení lze využít i pro testování dalších materiálů v případě, že k jejich analýze není zapotřebí vyvinout větší sílu než 50 N.



Obrázek 1: 3D vývojový model funkčního vzorku LVV-01



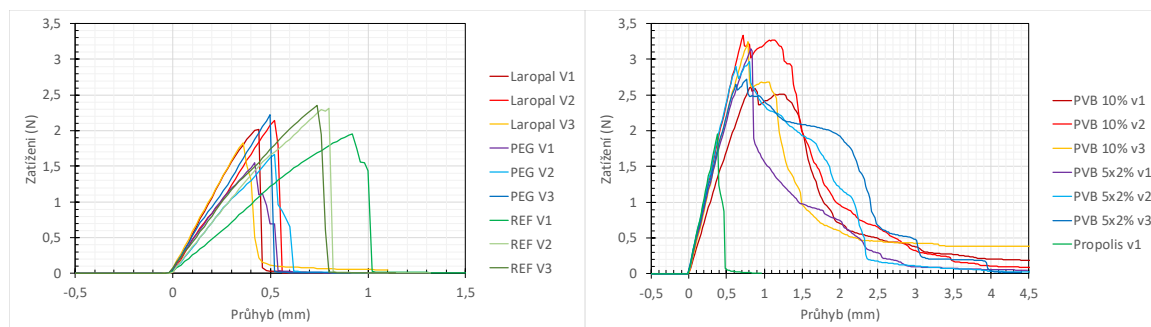
Obrázek 2: LVV-01. Konstrukce zařízení je kombinací ocelového lineárního vedení s valivými ložisky, 3D tištěných dílů (odolný ASA plast) a plexisklové klece. Zatěžovací jednotka (A) je ovládána krokovým motorem prostřednictvím tyče s přesným trapézovým závitem. Trn je dále vybaven tlakovým snímačem HT Sensor TAS501N a teplotním čidlem ADT7410 (B). Zatěžovací jednotka je prostřednictvím průhledné klece propojena se základnou, která je vybavena podstavcem vzorku. Geometrie zatěžovacích prvků odpovídá normě ČSN EN ISO 178 (Plasty – Stanovení ohybových vlastností) a vzhledem k záměru umístění celého zařízení do RTG svazku jsou kontaktní plochy podpěr i trnu provedeny z karbonových tyčí o poloměru 5 mm (C).

Řízení LVV-01 je realizováno pomocí programovacího rozhraní Python stejně jako zbývající motorizované komponenty dostupného mikro-CT systému. Pro vložení vzorku je nutné demontovat zatěžovací jednotku od klece. Po vložení vzorku na podstavec je zatěžovací jednotka upevněna zpět na své místo pomocí čtyř šroubů po obvodu klece. Následně může být spuštěn testovací proces. Systém v první fázi čeká na dosažení požadované teploty uvnitř klece a na její stabilizaci. Následně je provedena ohybová zkouška. Jejím cílem je zaznamenat závislost napětí vzorku na jeho průhybu, zjistit sílu nutnou ke zlomení vzorku a zaznamenat samotný průběh zlomení. Vzorek může být současně snímán rentgenovým svazkem, který poskytuje informace o topologii a rozvoji defektů v důsledku působení vnějších sil.

Ověření funkčnosti

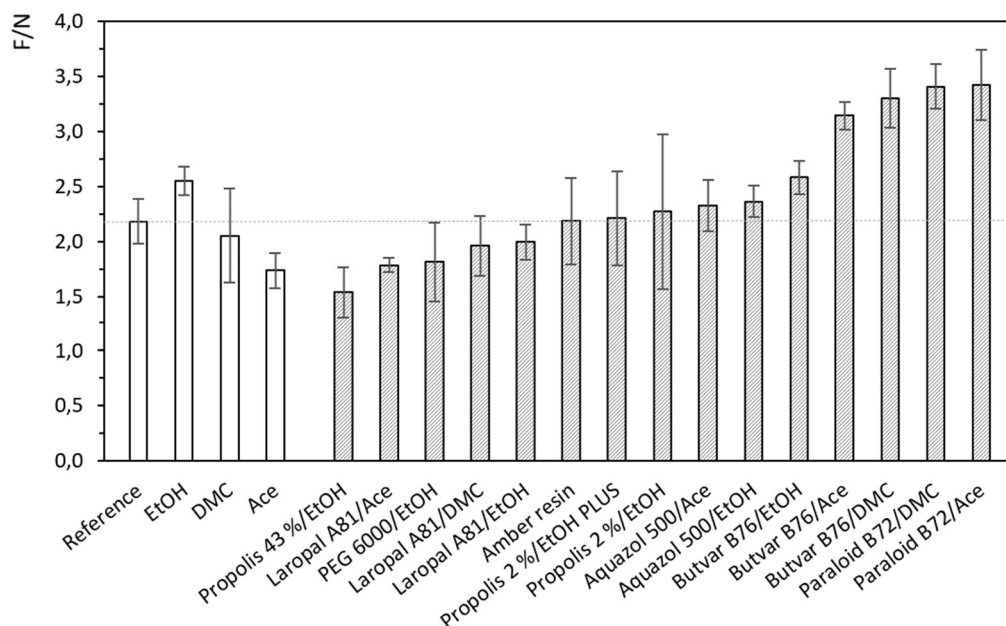
Přístroj LVV-01 byl v roce 2025 využit k měření mechanických vlastností konsolidovaných modelových trámců vyrobených z hydrogenovaného vosku. V rámci experimentální kampaně bylo testováno dvanáct různých kombinací rozpouštědel a konsolidantů, přičemž každá kombinace byla připravena ve třech opakováních, což zajišťuje statistickou validitu výsledků.

Záznam zátěžových charakteristik jedné ze sad testovaných vzorků je zobrazen níže (Obrázek 3).

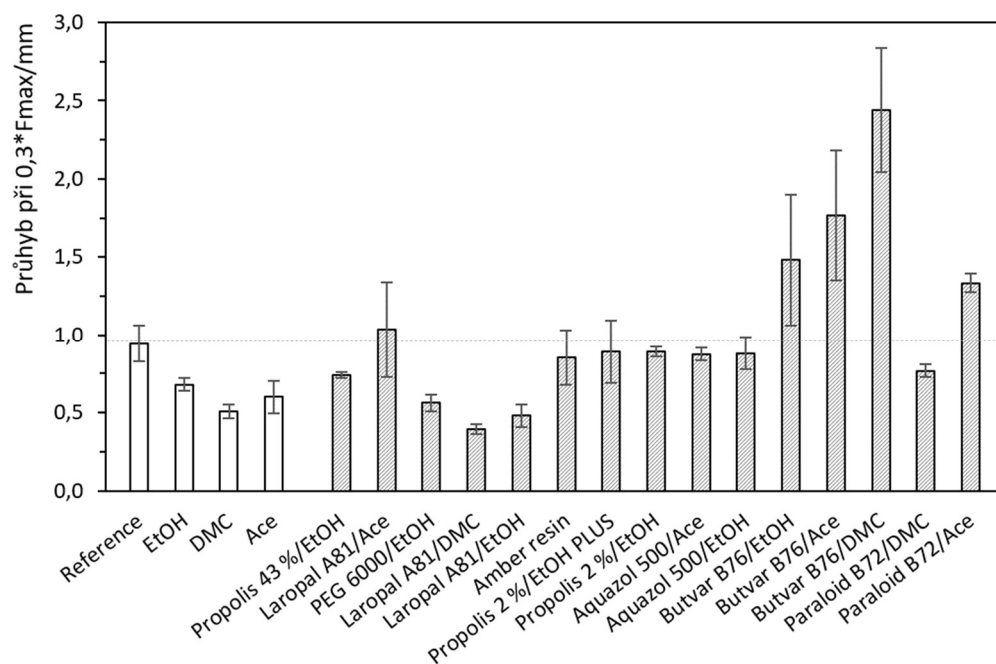


Obrázek 3: Ilustrační ukázky zátěžových charakteristik testovaných vzorků získaných pomocí LVV-01.

Každý vzorek prošel dvěma fázemi CT snímání – nejprve byl zaznamenán jeho počáteční stav před zatížením, následně byl proveden tříbodový ohybový test se záznamem potřebné síly, po kterém následovalo druhé CT snímání dokumentující stav po deformaci. Tímto způsobem bylo možné detailně sledovat vývoj vnitřních defektů a změn ve struktuře materiálu v průběhu mechanického zatěžování. Detailní interpretace výsledků je obsahem periodické zprávy projektu za rok 2025.

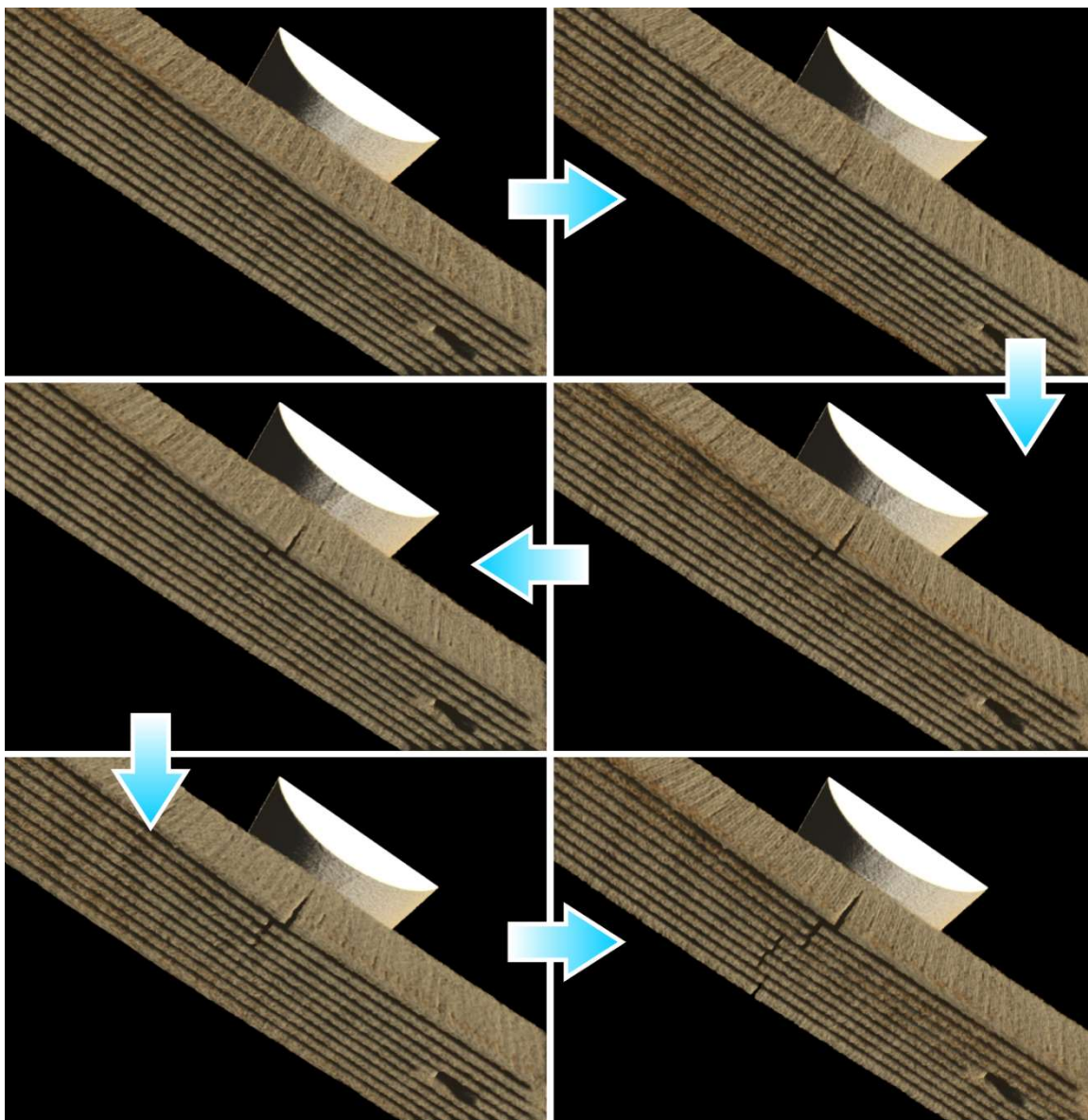


Obrázek 4: Maximální síla potřebná pro přerušení zkušebních těles. Chybové úsečky odpovídají směrodatné odchylce třech měření



Obrázek 5: Hodnoty smluvního průhybu odpovídající poklesu deformační síly na 30 %. Chybové úsečky odpovídají směrodatné odchylce třech měření

Funkční vzorek navíc zároveň v případě zájmu umožňuje souběžné snímání zátěžových charakteristik a snímání rentgenovým svazkem. Vizualizace získaná ze sady po sobě následujících tomografických měření během zatěžování vzorku zobrazuje rozvoj prasklin ve vzorku (Obrázek 6).



Obrázek 6: Vizualizace výsledků 4D CT skenu testovacího vzorku vosku získaných s využitím LVV-01 zobrazuje rozvoj prasklin vzorku v průběhu jeho zatěžování v rámci tříbodového ohybu.

Funkční vzorek bude využíván v souladu s plánem projektu pro testování mechanických vlastností modelových voskových trámců tříbodovým ohybem.

Ekonomické ukazatele

Využití výsledku

Výsledek je využíván vlastníkem

Vlastník

ČVUT / ÚTEF / oddělení fyzikálních aplikací a technologií (35231)

IČO: 68407700 - Vysoká škola (veřejná, státní) - Praha, Česko

Kategorie podle nákladů

Kategorie podle nákladů byla určena na základě členění RIV – menší nebo rovna 5 mil. Kč. Výsledek je provozován vlastníkem (ÚTEF ČVUT v Praze) pro potřeby partnerů projektu (NA ČR, VŠCHT).

Licence

Detailní digitální modely jednotlivých 3D tištěných komponent jsou k dispozici ve formě .stl souborů. Tyto modely společně s nákupním seznamem ostatních komponent a firmware řídící jednotky, stejně jako stavba dalších kusů funkčního vzorku mimo potřeby projektu je možná na základě uzavřené smlouvy s definovanými pravidly využití.

Dedikace

Funkční vzorek byl vytvořen jako hlavní výstup v rámci projektu Ministerstva kultury ČR, DH23P03OVV038 - Metody konsolidace křehkých pórovitých voskových pečetí.

Webové stránky

Projekt DH23P03OVV038

<https://www.nacr.cz/vyzkum-publikace-akce/vyzkum/projekty/metody-konsolidace-krehkych-porovitych-voskovych-peceti>

Funkční vzorek LVV-01

https://www.nacr.cz/wp-content/uploads/2025/11/pristroj_mereni_ohybovych_vlastnosti_Gfunk.pdf

Přílohy

Příloha č.1: Ověřovací protokol Gfunk – LVV-01.pdf