

DIGITALNA FABRIKACIJA TANKIH LJUSKI METODOM PLETENJA DIGITAL FABRICATION THIN SHELL BY THE KNITTING METHOD

Svetlana Vignjević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ARHITEKTURA I URBANIZAM

Kratak sadržaj – Istraživanje konstruktivnih sistema tankih ljuski metodom pletenja kao napredne tehnike u oblasti digitalnog dizajna i fabrikacije.

Ključne reči: Tanke ljuske, Digitalni dizajn, Digitalna Fabrikacija.

Abstract – Research into constructive system of thin shell using the knitting method as an advanced technique in the field of digital design and fabrication.

Keywords: Thin Shell, Digital Design, Digital fabrication.

1. UVOD

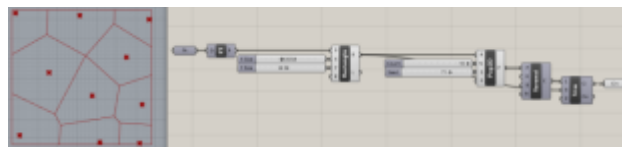
Digitalna tehnologija u savremenom dobu ima veliki uticaj sve naučne oblasti pa tako i na arhitekturu. Primena digitalne tehnologije u arhitekturi olakšava i ubrzava rad na projektima uopšteno u izradi kompleksnih konstruktivnih sistema kao što su tanke ljuske. Za razliku od konvencionalnog načina rada na izradi konstruktivnih sistema tankih ljuski, koji je zahtevao dugotrajan postupak u realizaciji, digitalna tehnologija dovela je do prekretnice i u ovoj oblasti. Digitalna izrada tankih ljuski ostvaruje se putem algoritamskog projektovanja i digitalne fabrikacije. U ovom kontekstu, digitalni dizajn i digitalna fabrikacija su postali ključni elementi istraživanja i razvoja, pružajući inovativne pristupe u rešavanju koplikovanih problema inženjerske prakse. Ovaj rad posvećen je istraživanju konstruktivnih sistema tankih ljuski metodom pletenja kao napredne tehnike u oblasti digitalnog dizajna i fabrikacije. Digitalni dizajn ima glavnu ulogu u savremenoj arhitekturi jer se korišćenjem algoritma i parametra stvaraju promenljivi oblici, dok digitalna fabrikacija ima značajan uticaj na industriju i proces proizvodnje.

2. DIGITALNI DIZAJN

Za izrau ovog projekta korišćeni su programi: **Rhinoceros3D 7** i **Grasshopper**. Početak rada na dizajnu strukture se zasniva na raspodeli tačaka unutar pravougaonika. Uz pomoć komponente **Populate2D** random dobijene tačke raspoređuju se u zadatom okviru. **Voronoi2D** formira linije oko tačaka koje koristimo kao vodilje. Za dalji rad koristimo samo dobijene linije unutar zadatog pravougaonika.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Bojan Tepavčević, red. prof.



Slika 1. Rezultati simulacije

Sledći korak je **PollyOffset** gde zadajemo rastojanje linija od centrale. Ulazni parametri su rastojanje dobijenih linija od središnje, a druga dva predstavljaju način povezivanja dobijenih linija (pr. **CF (ClosedFillet)** može biti kružan ili oštih ivica, isto tako i za **OF (OpenedFillet)**). Od dobijenih linija pravimo **Mesh**. Alatka koja od konture (**Contour (C) as list**) i rupe (**Hole (H) as list**) dobijene iz **PollyOffset** pravi **Mesh** je **MeshPatch**. **TriRemesh** od zadatog **Mesh**-a pravi **Mesh** sačinjen od jednakih truglova. Ulazne komponente za ovu alatku su **Mesh** dobijen iz **MeshPatch**, debljina i povezani kontura i rupa iz **PollyOffset**.



Slika 2. Rezultati simulacije

Za dalji rad na modelu potreban nam je plugin **Kanngaroo**. Nakon dobijenog **TriRemesh** izvlačimo iz njega liste tačaka će se koristiti u nastavku uz pomoć alatke **NakedVertex**. U ovom projektu imamo 235 tačaka. Za **PullPoint** ulazne komponente su tačke (**NakedVertex**) i linije koje se nalaze na podlozi modela. Ova komponenta predstavlja oslonac makete, odnosno tačke koje će se suprotstaviti simulaciji gravitacije koju postizemo paginom **Kanngaroo**. Jednostavnije rečeno ove tačke će ostati fiksirane za podlogu prilikom rada simulacije.

Glavna komponenta za pokretanje simulacije **Solver**, a da bi je pokrenuli potrebne su nam prepletene komponente kao što su: **Show**, **Anchor**, **VetexLoads** i **EdgeLengths**. Kao što sama reč kaže **Show** je prikaz. Sidro, odnosno **Anchor** omogućava vezivanje strukture za podlogu, da bi simulacija gravitacije povukla samo tačke koje su potrebne za odgovarajući izgled krajnjeg rezultata. Ulazna komponenta za **Anchor** jesu dobijene tačke uz pomoć **PullPoint**. **VetexLoads** osnim **Mesh**-a ima ulaznu komponentu u vidu slajdera koji predstavlja parametar za određivanje inteziteta simulacije, odnosno za visinu dobijene strukture. Dužina ivica krajnjeg **Mesh**-a se određuje pomoću **EdgeLengths**. U ovom projektu su zadržane automatski zadati parametri.

Da bi izbegli bagove i preopterećivanje programa tokom promena nekih od parametara u kodu u *Solver* smo uveli Reset dugme, kao i *TurnOn/Off*.



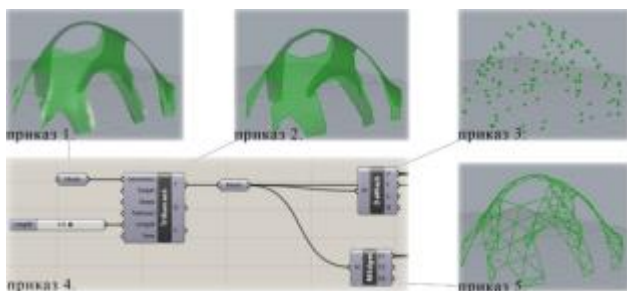
Slika 3. Rezultati simulacije

3. DIGITALNA FABRIKACIJA

Digitalna fabrikacija ovog projekta je logičan sled digitalnog dizajna, odakle je dobijeni projekat dalje korišćen za izradu delova za fabrikaciju. Kao i u digitalnom dizajnu program koji je korišćen je *Rhinoceros3D 7* sa *Grasshopper*-om. Pored digitalne fabrikacije koja je rađena u programu postoji proces baziran na dobijanju gotovih segmenata, koji se spajaju po tačno nažnačenim pravilima.

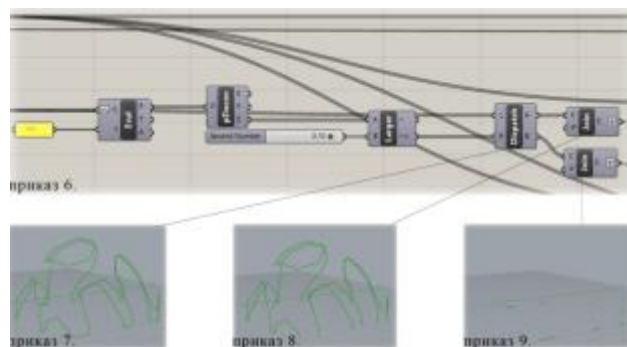
3.1. Priprema modela za fabrikaciju tankih ljsuki

Za nastavak koda potrebni su nam plugin *Ivy* i *Opennest* za *Grasshopper*. Deo koda koji možete videti na Prikazu 4. je početak rada na fabrikaciji ovog projekta. *Mesh* struktura zadata iz digitalnog dizajna, što predstavlja Prikaz 1, je osnovna forma koja će se u daljem kodu raščlaniti na trake za spajanje gotovog proizvoda. Elementi moraju biti planarni, kako bi bili tačni, uz pomoć alatke *TriRemesh* (Prikaz 2.) osnovni *Mesh* delimo na približno jednake trouglove. *Deconstruct Mesh* (Prikaz 3.) je alatka kojom smo razložili *Mesh* na tačke koje će nam služiti za dobijanje najbližih tačaka. Da bi dobili sve ivice *Mesh*-a korišćena je alatka *Mesh Edges* (Prikaz 5.) a u kasnijim koracima koda služi za pronalaženje kontura strukture odakle će se izvlačiti trake za fabrikaciju.



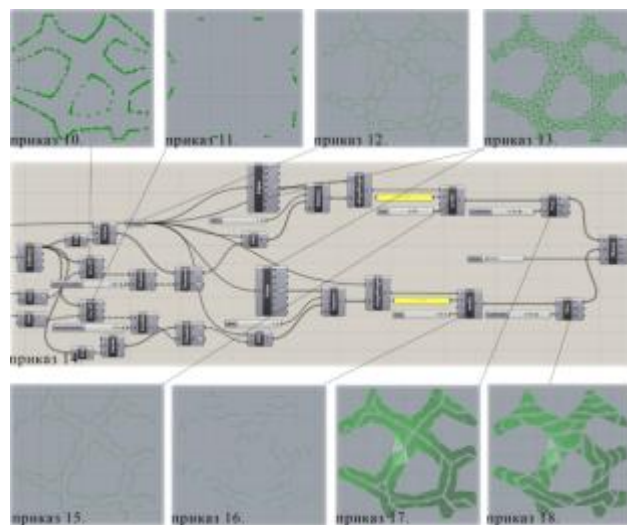
Slika 4. Rezultati simulacije

Povezivanjem dobijanih linija konture (*MEdge*) sa *Evaluate Curve* dobijamo konturne tačke. Da bi razdvojili linije koje su na podlozi od onih koje su deo strukture iznad, koristimo *Deconstruct Point (pDecon)* i uz pomoć *Larger Than* odvajamo tačke koje su na 0 u Z koordinati i sve ostale tačke. Na Prikazu 7. su prikazane linije iz obe liste što smo postigli sa *Dispatch*-om, za koji su ulazne informacije: *MEdge* i veće i jednako iz *Larger Than*. Lista A su linije strukture iznad 0 u Z koordinati (Prikaz 8), a B su linije na podlozi (Prikaz 9).



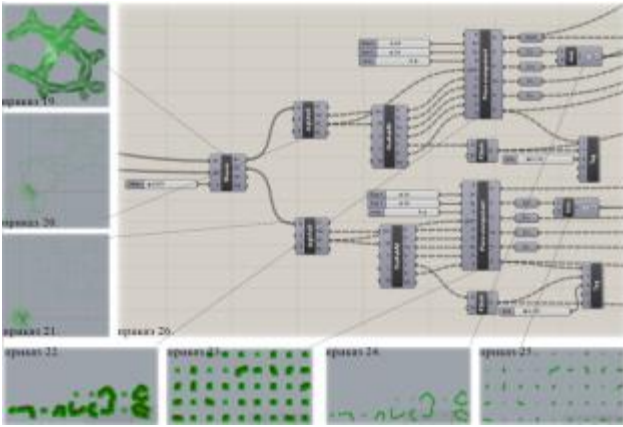
Slika 5. Rezultati simulacije

Koristeći *Join* alatke formirane su dve grupe linija, one koje su na podlozi i linije u gornjem delu strukture. *Curve closest point (Crv CP)* pronalazi najbliže tačke zadatim linijama (Prikaz 10. i 11). *Mesh Graph* je komponenta koja od *Mesh*-a pravi *Mesh* grafikon, kao što je prikazan na Prikazu 12. *Graph Edges* daje relevantne informacije (grafičke i numeričke) dobijene iz *Mesh Graph*-a. Još jedna bitna komponenta je *OPE (Orange Peel Edges)* koja daje setove ivica *Mesh Graph*-a kao odvojene delove ljsuke. *Custom Edge Weight (cEdgeWeight)* dodeljuje širinu ivica. Izračunavanje minimalnog obuhvata *Mesh Graph* korišćenjem modifikovanog Kruskalovog algoritma sa maksimalnim valentnim prioriteto dobijamo uz pomoć *mstKv (mst Kruskal Valence)*. Sledeći krak je dobijanje širine traka za fabrikaciju i to nam omogućava *Thin*, takođe iz *Ivy* plugina.



Slika 6. Rezultati simulacije

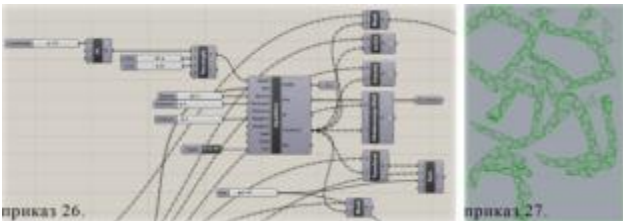
Ulazne komponente za *Weave* su *MeshGraph* iz *Thin*-a. Ova alatka predstavlja preplitanje traka u oba pravca dobijana iz prethodnog dela koda. Na Prikazu 19. može se videti kako preplitanje izgleda. Sledeći korak je odmotavanje segmenata i to se postiže *mgUroll (MeshGraph Unroll)*. Za pripremu fabrikacije potreban nam je *FlatFabM (Flat Fabrication Multi)* na koji se nadovezuje *Piece arrangement*, to je grupa koja uređuje komponente iz *FlatFabM*.



Slika 7. Rezultati simulacije

Na prikazu 24. i 25. može se videti krajnji izgleda svih segmenata ponaosob sa linijama savijanja, linijama oznaka svake površine i numeracijom svakog elementa spajanja. Svaki trougao iz trake ima svog para koji se prilikom spajanja mora idealno poklopiti. Da bi se to bilo olakšano obeležene su linije konture trougla i brojevi (pr. *U_15* i njegova par *D_15*). Srednja linija se zaseca tako da je savijanje bude olakšano, kao i provlačenje traka jednih između drugih.

Poslednja faza pisanja koda svodi se na pripremanje segmenata za sečenje na laseru. Uz pomoć *OpenNest* dobijamo segmente raspoređene u okviru koji predstavljaju dimenzije papira koji može stati u laser. Linije koje su dobijene iz *Piece arrangement* se uz pomoć *OpenNest* izlazne komponent – *Transform* postavljaju unutar zadatih okvira.



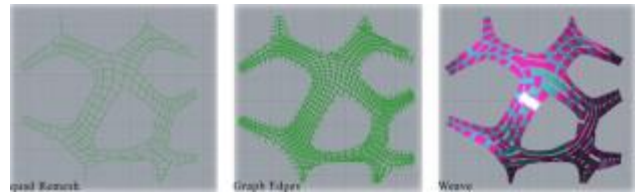
Slika 8. Rezultati simulacije

3.2. Fabrikacija

Poslednji postupak koji se odvija na ovom projektu je izrada finalnih segmenata i njihovo spajanje u konačan proizvod. Fabrikacija je vršena uz pomoć lasera. Pripremljeni okviri sa trakama za maketu koje smo dobili uz pomoć *OpenNest* se bejkuju (*Bake*), što znači da se linije dobijene u *Grasshopper*-u prebacuju u *Rhinoceros3D*.

3.2.1. Prva studija

Ova studija je rađena sa *Quad* segmentima, što znači da je deo digitalne fabrikacije drugačije koncipiran. Na samom početku smo (u prethodnom objašnjenom postupku) imali podelu *Mesh*-a na približno jednake trouglove (*TriRemesh*), u ovoj izradi smo podelu *Mesh*-a vršili na kvadrate koristeći alatku *QRSettings* (*QuadRemeshSettings*) i *QRMesh* (*QuadRemesh*). Ovim postupkom smo dobili značajno tanje trake za fabrikaciju kao i komplikovaniji metod preplitanja, a što je i uticalo da ova studija bude neuspešna.



Slika 9. Slika 10.

Slika 11.

Prva studija je neuspešna iz više razloga: segmentacija *Mesh*-a na *Quad* segmente nije dobra, jer razvijene trake za fabrikaciju nisu planarne i dolazi do nepoklapanja delova koji se prepliću i spajaju; debljina papira koja korišćena za ovu studiju je 250g, što nije bilo dovoljno za izradu ove makete i poslednja stavka koja je uticala na ovu fabrikaciju jeste podešavanje jačine graviranja i zasecanja lasera, koja su bila prejaka i došlo je do cepanja papira.



Slika 12.

Slika 13.

Slika 14.

Na slikama iznad su prikazane fotografije prve studije.

3.2.2. Druga studija

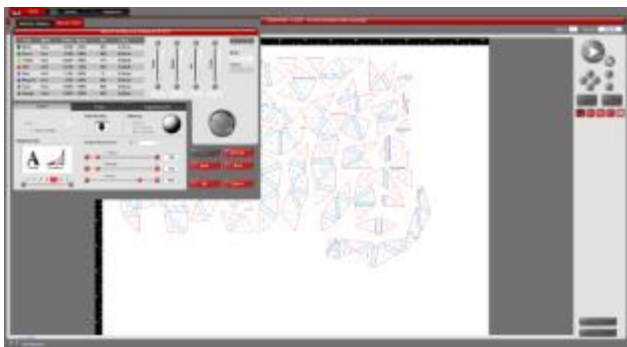
Vodeći računa o prethodno navedenim stavkama, za sledeći studiju odabrani su drugačiji postupci izrade makete. Detaljna digitalna fabrikacija ovih elemenata objašnjena je u poglavlju 3.1. Debljina papira koja je korišćena u ovoj izradi je 300g.



Slika 15. Fotografija finalne makete

Zaključak nakon prve izrade makete, da je graviranje linija prejako, dovelo je do promene podešavanja jačine lasera. U ovom slučaju imamo 4 različite boje koje koristimo. Crvena je za sečenje, podešena za snagu su 92% za brzinu 60%, PPI je 200 i dubina Z ose je 0.3mm. Plava i zelena linija imaju ista podešavanja (snaga 17%, brzina 100%, dubina Z ose je 0.2mm) za sve sem za PPI, koji je za plavu liniju podešen na 15, a za zelenu na 200 kao što je za crvenu. Zbog ove razlike u PPI zelene linije su gravirane u celini, što je bitno kod savijanja papira, a plave su gravirane kao tačkice da ne bi došlo do savijanja i pucanja na mestima gde to nije potrebno. Crna boja predstavlja boju za graviranje oznaka. Kod podešavanja

za ovu boju bitno je da PPI bude veliki da bi tekst bio čitljiv. Sa druge strane ne treba da bude prejak laser prilikom ovog graviranja da ne bi ošteti papir.



Slika 16. Podešavanje lasera

Zasecanjem podloge na mestima njenog spajanja sa strukturom dobili smo neku vrstu temelja za nju. Osim što je svrha da drži maketu pričvršćenu za tlo, ovi zaseci suzbijaju sile koje šire krake makete i tako zadržava traženi oblik.

Oznake koje se nalaze na svakom trouglu označava njegov broj i da li predstavlja gornji ili donji deo tokom preplitanja traka. Svaka traka koja je fabrikovana sastoji se od trougla i prostora između koji služi za savijanje. Svaki trougao ima svog para sa kojim se spaja. Ti parovi su identičnih dimenzija. Primer oznake je *U_15* i njegov par *D_15*. *U* predstavlja *Under*, odnosno iznad, dok je *D* *Down* što znači da taj deo ide ispod. Naizmenično preplitanje ovih oznaka predstavlja pletenje traka jedne između drugih.



Slika 17. Fotografija finalne makete

4. ZAKLJUČAK

Ljuske kao konstruktivni sistemi u arhitekturi omogućavaju poigravanje sa oblicima zgrada i infrastrukturnih objekata poput mostova i vijadukta. Uz pomoć ljuski dolazi se do realizacije izgleda objekata koji prostoru, u kojem se nalaze, daju potpuno drugačiju dimenziju, jer se radi o zavijenim valovitim strukturama. Kako je arhitektura usko vezana sa umetnošću, upravo ovaj sistem gradnje omogućava da umetnost u arhitekturi dođe do potpunog izražaja.

Kroz digitalni dizajn i digitalnu fabrikaciju, omogućeno je da se u arhitekturi ljuske kao konstruktivni sistemi koriste mnogo lakše, odnosno da projektovanje bude brže i jednostavnije, a realizacija sa manje troškova.

Iz svega navedenog možemo doći do zaključka, da se uz pomoć digitalnog dizajna i digitalne fabrikacije, došlo do konačnog idejnog rešenja uz ogromnu uštedu vremena i materijala bez obzira što se radi o jednom od najkompleksnijih sistema.

Istaživanje ovog projekta se zasniva na ispitivanju metoda pletenja traka za izradu tanke ljuske. Na modelu koji je dobijen uz pomoć *Kangaroo* plagina ispitana su dva načina pletenja segmenata. Prvi, koji je rađen sa *Quad* segmentima, nije dao zadovoljavajuće rezultate. Veliki broj traka koje su se preplitale su otežale deo fabrikacije i došlo je do oštećenja segmenata.

Drugi pokušaj izrade modela od prefabrikovanih traka od papira je daleko uspešniji. Suštinske promene su uticale na dobar finalni rezultat. Geometrija modela je promenjena iz kvadratnih delova u približno jednake trouglove, što je doprinelo u tačnosti kasnije fabrikacije. Takođe, bitna promena u drugoj izradi makete jesu podešavanja lasera koja su više prilagođena samom modelu i finalnim segmentima.

4. LITERATURA

Slike 1 - 17. Autorske slike

Kratka biografija:



Svetlana Vignjević rođena je u Vrbasu 1998. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Arhitektura i urbanizam – Digitalna fabrikacija tankih ljuski metodom pletenja odbranila je 2024.god.
kontakt: lanalankesterska@gmail.com