Ispitivanje i optimiranje karakteristika spoja električnih vodiča u automobilskoj industriji

Strunje, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:386384

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Strunje

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Karlo Strunje

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem tvrtki Yazaki Europe što su mi omogućili sve što je potrebno za izradu mog diplomskog rada.

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Ireni Žmak i asistentu Milanu Vukšiću, mag. ing. cheming. na dostupnosti i pomaganju svojim znanjem i iskustvom.

Također zahvaljujem svim profesorima FSB-a na prenesenom znanju.

Zahvaljujem svojoj obitelji na strpljivosti i podršci tijekom moga studija.

Karlo Strunje

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KARLO STRUNJE** Mat. br.: 0035200143

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje i optimiranje karakteristika spoja električnih vodiča u automobilskoj industriji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing and optimizing the characteristics of terminal crimping for automotive industry**

Opis zadatka:

Moderna automobilska industrija postavlja sve veće zahtjeve na unapređenje svih sustava motornih vozila, pa tako i na električne komponente. Spajanje električnih završetaka vodiča (tzv. terminala) metodom savijanja (engl. crimp) omogućuje spajanje vodiča bez lemljenja, čime je spoj vodiča čvršći. Optimalno oblikovani savojni spoj vodiča smanjuje mogućnost korozije vodiča isključivanjem pristupa kisika i vlage i ima niži električni otpor. Također, zbog sve strožih ekoloških zahtjeva, kako tijekom proizvodnje električnih komponenata, tako i na kraju životnog vijeka vozila, postupak lemljena vodiča nastoji se zamijeniti drugim postupcima spajanja.

U okviru ovog rada potrebno je za tri različite debljine električnih vodiča, tri različite vrste prevlaka (kositar, srebro i zlato) na savojnim spojnicama i tri različite visine savojnih spojnica isplanirati ispitivanja. Prema definiranom planu ispitivanja potrebno je izraditi ispitne uzorke. Na uzorcima provesti vizualnu kontrolu, analizu spoja svjetlosnim mikroskopom i mjerenje električnog otpora. Pripremljene uzorke potrebno je toplinski umoriti normiranim postupkom te im ponovo ispitati električni otpor i odrediti vlačnu čvrstoću.
Metodom odzivne površine (engl. Response Surface Methodology, RSM) potrebno je utvrditi utjecaj pojedinih nezavisnih varijabli na zavisne varijable pomoću odzivne funkcije. Cilj optimiranja je izbor najpovoljnijeg materijala prevlake, debljine vodiča i visine spojnica u steznom spoju terminala za postizanje najboljih mehaničkih, električnih i eksploatacijskih svojstava, uz što niže troškove.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
24. rujna 2020.	26. studenog 2020.	30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA VI
POPIS OZNAKA VII
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
1.1. Razvoj automobilske industrije 2
1.2. Automobilska industrija u Hrvatskoj 3
1.3. Problemi u automobilskoj industriji 4
2. ELEKTRIČNI VODIČI I IZOLATORI 6
2.1. Električni vodiči i izolatori u automobilima 8
2.1.1 Odabir prave veličine žice 11
2.1.2. Materijali vodiča (žice) 12
2.1.3. Materijali izolatora 13
2.4. Recikliranje kabela 14
3. TERMINALI 17
4. STEZNO SPAJANJE VODIČA 23
4.1. ALATI ZA STEZNO SPAJANJE VODIČA 24
4.1.1. Ručni alat za stezno spajanje vodiča 25
4.1.2. Aplikatori 27
4.2. STEZNI SPOJ VODIČA 33
4.2.1. Dijelovi steznog spoja vodiča i izolacijskog vodiča 37
5. VIZUALNI PREGLED STEZNOG SPOJA VODIČA 41
6. ELEKTRIČNI OTPOR 44
6.1. LEMLJENJE 46
7. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE 48
8. PLANIRANJE POKUSA 50
9. EKSPERIMENTALNI DIO 55

9.1. CILJ RADA 55
9.2. PRIMJENA METODE ODZIVNE POVRŠINE 55
9.3. PRIPREMA UZORAKA ZA ISPITIVANJE 71
9.4. REZULTATI ISPITIVANJA 74
9.4.1. Rezultati mjerenja otpora 76
9.4.2. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće 80
10. ZAKLJUČAK 85
LITERATURA 86
PRILOZI 90

POPIS SLIKA

Slika 1. Automobilska industrija [2] 1
Slika 2. Prvi automobil [3].....2
Slika 3. Rimac Concept one [7] 4
Slika 4. Specifična vodljivost tehničkih materijala [10].....7
Slika 5. Konstrukcija kabelskog snopa [11] 9
Slika 6. Kabelski snop [12].....10
Slika 7.Presjek električnog kabela s više manjih žica i jednom velikom žicom [13] 11
Slika 8. Različite veličine električnog vodiča [14] 12
Slika 9. Tokovi materijala u postupku prerade kabelskog otpada [17] 15
Slika 10. Bakrene granule nakon procesa recikliranja kabela [11].....16
Slika 11. Jednodijelni ženski terminal [18] 18
Slika 12. Jednodijelni muški terminal [18].....18
Slika 13. Presjek kontakta (spoja) muškog i ženskog terminala [18] 19
Slika 14. Dvodijelni ženski terminal [18].....19
Slika 15. Dvodijelni muški terminal [18] 20
Slika 16. Prstenasti terminali [20].....21
Slika 17.Muški i ženski pritisni terminali [21] 21
Slika 18. Muški i ženski metak terminali [23].....22
Slika 19. Stezno spajanje vodiča [18].....24
Slika 20. Odabir ispravnog terminala za stezno spajanje vodiča [26].....25
Slika 21. Skidanje izolacije sa žice [26].....26
Slika 22. Uvijanje žice [26] 26
Slika 23. Stezno spajanje terminala i kabela ručnim alatom [26].....27
Slika 24. Dijelovi aplikatora [27].....28
Slika 25. Aplikator s mehaničkim sustavom dovoda [28].....29
Slika 26. Aplikator s pneumatskim sustavom dovoda [28] 30
Slika 27. Traka s terminalima koja dolazi s prednje strane aplikatora (gore) i s bočne strane (dolje) [18].....31
Slika 28. Potpuno automatiziran stroj za stezno spajanje vodiča [29] 32

Slika 29. Maksimalna količina stezno spojenih terminala u jednom satu ovisno o alatu kojim se stezno spaja vodič [30] 32
Slika 30. Graf mehanička i električna svojstva ovisna o visini steznog spoja vodiča [30] 34
Slika 31. Oblici steznog spoja vodiča s otvorenim krilima nakon steznog spajanja [18] 35
Slika 32. Oblici steznog spoja vodiča sa zatvorenim krilima nakon steznog spajanja vodiča [18] 36
Slika 33. Oblici izolacijskog steznog spoja vodiča [18] 36
Slika 34. Dijelovi steznog spoja vodiča i izolacijskog steznog spoja vodiča, 1. dio [32] 38
Slika 35. Dijelovi steznog spoja vodiča i izolacijskog steznog spoja vodiča, 2. dio [32] 40
Slika 36. Mjerenje visine i širine zone steznog spoja vodiča mikrometrom i pomičnim mjerilom [32] 42
Slika 37. Optički mjerni mikroskop [35] 43
Slika 38. Relativni otpor steznog spajanja na žicu [36] 45
Slika 39. Otpornost vodiča [37] 46
Slika 40. Lemna žica u sredini sa smolastom tvari na bazi kolofonija [38] 47
Slika 41. Ispitivanje vlačne čvrstoće [32] 49
Slika 42. Grafički prikaz potpunog plana pokusa 2^3 [39] 50
Slika 43. Box-Behnkenov plan pokusa [40] 53
Slika 44. Normalizirani papir vjerojatnosti za električni otpor steznog spoja 59
Slika 45. Slučajno rasipanje ostatka za električni otpor steznog spoja 60
Slika 46. Prikaz odzivne površine otpora pri promjeni visine spoja i debljine žice 61
Slika 47. Prikaz odzivne površine otpora pri promjeni cijene i debljine žice 62
Slika 48. Prikaz odzivne površine otpora pri promjeni visine spoja i cijene 63
Slika 49. Normalizirani papir vjerojatnosti za vlačnu čvrstoću 66
Slika 50. Slučajno rasipanje ostatka za vlačnu čvrstoću 67
Slika 51. Prikaz odzivne površine čvrstoće pri promjeni visine spoja i debljine žice 68
Slika 52. Prikaz odzivne površine čvrstoće pri promjeni cijene i debljine žice 69
Slika 53. Prikaz odzivne površine čvrstoće pri promjeni visine spoja i cijene 70
Slika 54. Tri različita terminala 71
Slika 55. Komax Alpha 360 72
Slika 56. Shema 27 kombinacija 73
Slika 57. Uzorci spremni za ispitivanje 73

Slika 58. Optički mikroskop Olympus SZX12 74
Slika 59. ML 3212 Micro Lab od C-Tec 75
Slika 60. Poprečni presjek unutarnje površine zone steznog spoja vodiča 75
Slika 61. Uređaj Agilent 45338B miliommetar 76
Slika 62. Vötsch VT³ 7012 S2 komora 77
Slika 63. Kidalica Zwick Roell Z010 80
Slika 64. Postavljanje ispitnog uzorka na kidalici 81
Slika 65. Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja vodiča, srebrna prevlaka 82

POPIS TABLICA

Tablica 1. Matrica kodiranih vrijednosti glavnih utjecaja i međudjelovanja za 2^3 51
Tablica 2. Plan pokusa generiran programom Design Expert 56
Tablica 3. Rezultati analize varijance za otpor 57
Tablica 4. Pregled statističkih podataka za otpor 58
Tablica 5. Rezultati analize varijance za vlačnu čvrstoću 64
Tablica 6. Pregled statističkih podataka za vlačnu čvrstoću 65
Tablica 7. Rezultati srednjih vrijednosti otpora za 0,50 mm² debljine žice prije i poslije temperaturnog šoka 78
Tablica 8. Rezultati srednjih vrijednosti otpora za 0,75 mm² debljine žice prije i poslije temperaturnog šoka 78
Tablica 9. Rezultati srednjih vrijednosti otpora za 1,00 mm² debljine žice prije i poslije temperaturnog šoka 79
Tablica 10. Rezultati maksimalne sile, maksimalnog produljenja i vlačne čvrstoće za žicu površine 0,50 mm² 83
Tablica 11. Rezultati maksimalne sile, maksimalnog produljenja i vlačne čvrstoće za žicu površine 0,75 mm² 83
Tablica 12. Rezultati maksimalne sile, maksimalnog produljenja i vlačne čvrstoće za žicu površine 1,00 mm² 84

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Presjek površine
F_m	N	Maksimalno postignuta sila
I	A	Jakost struje
l	m	Duljina žice
R	Ω	Električni otpor žice
R_c	Ω	Električni otpor na steznom spoju vodiča
R_m	N/mm^2	Vlačna ili rastezna čvrstoća
$R_{rel.}$	/	Relativni otpor steznog spajanja na žicu
R_w	Ω	Električni otpor žice
S_0	mm^2	Presjek površine vodiča
U	V	Napon
ρ	/	Otpornost materijala

SAŽETAK

Moderna automobilska industrija značajno doprinosi globalnom zagađenju okoliša i ima velike utjecaje na promjenu klime. Potrošnja goriva snažno je pod utjecajem mase automobila. Postavljaju se sve veći zahtjevi na unaprjeđenje svih sustava motornih vozila, pa tako i na električne komponente.

Spajanje terminala metodom steznog spajanja (svakodnevni izraz je „krimpanje“, prema engl. *crimp*) s vodičem (žicom) čine stezni spoj koji ima niži električni otpor i manju mogućnost korozije u odnosu na lemljeni spoj.

U radu je isplanirano ispitivanje za tri različite debljine električnog vodiča (žice), tri različite prevlake (kositar, srebro, zlato) na terminalima i tri različite visine steznog spajanja terminala i žice. Provedena ispitivanja mogu se podijeliti na dva dijela.

Prvi dio ispitivanja utvrdio je utjecaj nezavisnih varijabli na zavisne varijable metodom odzivne površine. Nezavisne varijable su tri različite debljine žice (0,5 mm², 0,75 mm² i 1 mm²), tri visine stezno spojenog vodiča (1,35 mm, 1,39 mm i 1,43 mm) i tri različite cijene za tri različita terminala (0,2 USD za terminal s kositrenom prevlakom, 0,4 USD za terminal s prevlakom srebra i 0,6 USD za terminal s prevlakom zlata), dakle ukupno 27 kombinacija za plan pokusa. Zavisne varijable su električni otpor i vlačna čvrstoća spoja. Optimiranjem je dobiveno predviđanje koji bi materijal prevlake, debljina žice i visina steznog spajanja vodiča bila najpovoljnija za postizanje što manjih vrijednosti otpora i što većih vrijednosti vlačne čvrstoće.

Drugi dio ispitivanja uključuje izradu ukupno 270 uzoraka (za 27 kombinacija) na kojima je provedena vizualna kontrola, analiza spoja svjetlosnim mikroskopom, mjerenje električnog otpora prije i poslije normiranim postupkom unesenog toplinskog umora materijala te određivanje vlačne čvrstoće spoja na univerzalnoj kidalici.

Utvrđeno je da terminal s prevlakom kositra, na debljini žice 0,75 mm² i visini steznog spajanja vodiča na visinu 1,43 mm daje najbolja mehanička, električna i eksploatacijska svojstva, uz što manje troškove.

Ključne riječi: automobilska industrija, vodič, električni terminal, stezni spoj vodiča, stezno spajanje vodiča, električni otpor, vlačna čvrstoća

SUMMARY

The modern automotive industry contributes significantly to global environmental pollution and has a major impact on the climate change. Fuel consumption is strongly influenced by the weight of the car. There are increasing demands for the improvement of all motor vehicle systems, including electrical components.

The connection of the terminal by the method of plastic connection (crimping) with a conductor (wire) makes a connection that has a lower electrical resistance and is more corrosion resistant compared to soldering.

In this thesis, an experiment was designed for three different thicknesses of electrical conductor, three different coatings (tin, silver, gold) at the terminals and three different heights of crimp connection of the terminal and wire. The study can be divided into two parts.

The first part of the study determined the influence of independent variables on the dependent variables using the Response Surface Method. The independent variables were three different wire thicknesses (0.5 mm², 0.75 mm² and 1 mm²), three crimp heights (1.35 mm, 1.39 mm, 1.43 mm) and three different prices for three different terminals (0.2 US$ for the tin-coated terminal, 0.4 US$ for the silver-coated terminal, 0.6 US$ for the gold-coated terminal), i.e. a total of 27 experiments. The dependent variables were electrical resistance and tensile strength of the crimp.

By optimizing, a prediction model was achieved to determine which coating material, wire thickness and crimping height would be the most favourable for achieving the lowest possible resistance values and the highest possible tensile strength values.

In the second part of the test, 270 samples (27 combinations) were made, on which visual control is performed, analysis of the connection with a light microscope, measurement of electrical resistance before and after thermal fatigue by standardized procedures and determination of tensile strength on the universal testing machine.

The tin-coated terminal, with a wire thickness of 0.75 mm and a crimping height of 1.43 mm, provides the best mechanical, electrical and operational properties, at the lowest available cost.

Key words: automotive industry, conductor, electrical terminal lug, crimp, crimping, electrical resistance, tensile strength

1. UVOD

Automobilska industrija obuhvaća širok popis kompanija koje su se specijalizirale u područjima konstrukcije, marketinga, proizvodnje, prodaje automobila i dijelova za automobile.

Automobilska industrija ne uključuje industrije posvećene održavanju nakon isporuke krajnjem korisniku, kao što su radionice za popravak automobila ili benzinske postaje. Iako oni jesu u bliskoj suradnji, tu je granica ipak jasna.

Tvrtke koje proizvode automobile spadaju među najsnažnije tvrtke u svijetu jer je autoindustrija jedna od vodećih svjetskih industrija. Procjenjuje se da trenutno proizvedeni automobili imaju tržišnu vrijednost od dva trilijuna dolara. Automobili su u masovnoj prodaji preko jednoga stoljeća, a trenutno je sva proizvodnja svedena na nekoliko desetaka velikih i snažnih korporacija ogromne burzovne vrijednosti. (poput američkog General Motorsa, njemačkog Mercedes-Benza, japanskog Nissana i francuskog Renaulta), slika 1 [1].



Slika 1. Automobilska industrija [2]

1.1. Razvoj automobilske industrije

Povijest automobilske industrije seže još u davnu 1860. godinu, kada su se pojavili mnogi proizvođači kočija koje su vozile bez potrebe za konjima, slika 2. Njemački izumitelj Karl Benz je 1886. patentirao svoj „Benz Patent – Motorwagen“ i tim činom upisao datum rođenja suvremenog automobila u povijesne knjige.



Slika 2. Prvi automobil [3]

Ubrzo se automobil prihvaća u Sjedinjenim Američkim Državama, a nešto kasnije i u Europi. Automobili su postali šire dostupnima u ranom dvadesetom stoljeću. Amerikanac Henry Ford 1908. godine prvi je uveo serijsku proizvodnju automobila na pokretnoj traci. Tako se znatno povećala proizvodnja uz smanjenje proizvodnih troškova, pa je automobil postao razmjerno jeftin i dostupan širim slojevima. Sjedinjene Američke države predvodile su svijet u ukupnoj proizvodnji automobila. U početku je čak 270 tvornica proizvodilo automobile, a s vremenom je ta brojka proizvođača opala, dok je broj proizvedenih automobila rastao. U to vrijeme američka automobilska industrija proizvela je 90 % svjetske proizvodnje automobila i Sjedinjene Američke Države imale su prosječno jedan automobil na pet stanovnika. Po završetku Drugog svjetskog rata, na svjetskome tržištu proizvođača automobila javljaju se europske, japanske i korejske tvrtke i postaju konkurentnima američkim. 1980. godine Japan pretječe Sjedinjene Američke Države u ukupnoj proizvodnji automobila sve do 1994. godine, kada se Sjedinjene Američke Države ponovno vraćaju na vodeću poziciju. 2006. godine Japan usko pobjeđuje Sjedinjene Američke Države i zadržava se na vodećoj poziciji do 2009. godine.

Tada se pojavljuje Kina, koja danas preuzima svjetski vrh u proizvodnji automobila. 2012. godine Kina je gotovo udvostručila američku proizvodnju automobila [4].

Danas su u Sjedinjenim Američkim Državama najznačajnije automobilske kompanije General Motors, Ford i Chrysler, u Japanu Toyota, Nissan i Mitsubishi, u Njemačkoj Volkswagen, Daimler-Benz i BMW, u Francuskoj PSA (Peugeot/Citroën) i Renault, u Italiji Fiat te u Južnoj Koreji Hyundai.

Automobilska industrija ima velik utjecaj na razvoj drugih gospodarskih grana koje rade izravno ili neizravno za njezine potrebe, kao što su industrija čelika, motornih goriva i maziva, pneumatika, stakla, boja, lakova, elektrotehnička industrija itd.

Danas je na cestama preko milijardu automobila i lakih kamiona, koji godišnje potroše preko 100 milijardi litara benzina i dizelskog goriva. Automobil je primarni način svakodnevnog prijevoza („od točke A do točke B“) većini građana. Razvoj automobilske industrija trenutno je usporen i očekuje se da će se taj trend nastaviti jer se sve više počinju koristiti druga prijevozna sredstva pogotovo u urbanim središtima. Zahtjevi prema automobilskoj industriji naglo su porasli: lakša vozila, široka ponuda modela i vrhunska kvaliteta izrade traže se na svim tržištima diljem svijeta. Inteligentne funkcije u automobilima se sve više koriste u svrhu pomoćnih sustava i IT (engl *Information Technology*) integracije, uključujući integracije pametnih telefona, inteligentne optimizacije potrošnje, automatskog kočenja i upravljačkih sustava. Inženjerstvo se dodatno suočava i s izazovima poput kratkog životnog ciklusa proizvoda, smanjenim rokovima za početak proizvodnje, brzim puštanjem u pogon, te osiguravanje široke dostupnosti. Očito je da brojni i kompleksni zahtjevi moraju biti konfigurirani individualno i složeni u okvir fleksibilnog standardiziranog procesa. To osigurava da mnoge varijante proizvoda teku kroz proizvodni proces bez poteškoća [5].

1.2. Automobilska industrija u Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj, zbog gospodarske politike koja je bila vođena u bivšem sustavu, automobilska industrija nije razvijena. Međutim, danas djeluje veći broj tvrtki koje se bave proizvodnjom automobilskih dijelova te servisnom i remontnom djelatnošću za osobne automobile i gospodarska vozila. Razvoj hrvatske automobilske industrije temelji se na dugoj tradiciji u srodnim sektorima, poput metalne proizvodnje, zavarivanja, proizvodnje polimernih proizvoda te inženjeringu. Na hrvatskom tržištu prisutne su kompanije koje su se uspješno

integrirale u sustav dobavljača rezervnih dijelova za vrhunske svjetske proizvođače automobila (PSA, GM, Fiat, BMW, Audi, Ford, Renault, Toyota, Volvo i sl.), a oko 90 % prihoda automobilske industrije generira se izvozom [6].

Tendencija razvoja automobilske industrije u Hrvatskoj je pozitivna. Hrvatska se može pohvaliti proizvodnjom električnih automobila DOK-ING XD tvrtke DOK-ING te Concept One i Concept Two tvrtke Rimac Automobili, slika 3. Prednosti ulaska autoindustrije u Republiku Hrvatsku su, uz kvalitetno obrazovanu radnu snagu, izvrsna infrastruktura te blizina tržišta i pogona za proizvodnju automobila zemalja Zapadne i Srednje Europe.



Slika 3. Rimac Concept one [7]

1.3. Problemi u automobilskoj industriji

Automobilska industrija značajno doprinosi globalnom razvoju zagađenja okoliša i igra važnu ulogu u promjeni klime. Transportni sektor čini 14% globalne emisije stakleničkih plinova od kojih je 72% posljedica cestovnog prometa. U tom pogledu automobili su odgovorni za otprilike 12% emisija stakleničkih plinova u Europi. Stoga je Europska komisija postavila obvezne ciljeve smanjenja emisija koje sve članice trebaju ispuniti. Zbog intenzivnog prometa i ponavljajućih epizoda zagađenja u nekim slučajevima potrebno je regulirati, čak i ograničiti cirkulaciju prometa u gradskim središtima. Inovativne tehnologije mogu pomoći proizvođačima da smanje potrošnju goriva i nastale emisije. Trenutačno se automobilska industrija bavi tranzicijom prema učinkovitijim i električnim ili obnovljivim gorivima, kao i

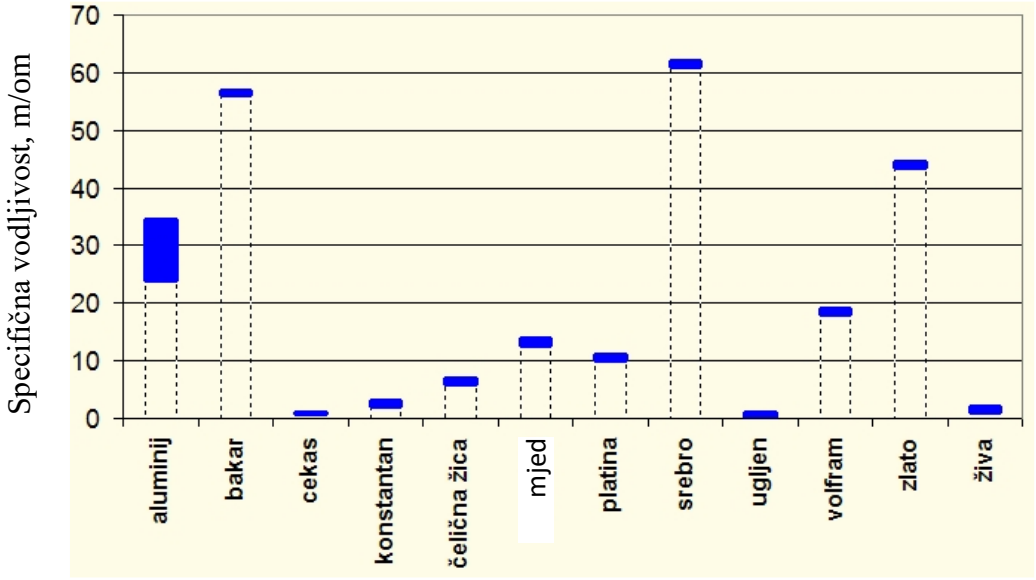
redizajniranjem dijelova automobila. Potrošnja goriva značajno ovisi o masi automobila: trećina potrošnje goriva ovisi o tome. Procjenjuje se da svako 15 %-tno smanjenje mase vozila može smanjiti potrošnju goriva za oko 7 %. Smanjenjem mase vozila, sile koje motor mora savladati su manje, a prema tome je potrebna snaga za kretanje smanjena.

Nekoliko je načina za smanjenje prosječne mase automobila: zamjenom lakšim materijalima, promjenom dizajna automobila ili smanjivanje veličine vozila [8].

Masa prosječnog osobnog automobila kreće se od 1300 kg do 1800 kg. Glavni materijali u automobilu su i danas čelik, koji čini 63 % mase, razni materijali 16 %, polimerni materijali 12 %, aluminijske legure 7 % te bakar i bakrene legure 1 %. Zamjena čelika, polimera i aluminija drugim materijala koji su lakši i možda boljih svojstava je moguća, ali troškovi proizvodnje su dosta veliki. Iako relativno malog udjela u masi automobila, bakar je ključan materijal u automobilima: u funkcionalnosti vozila, učinkovitosti, udobnosti i sigurnosti. Najveći dio bakra koristi se kod ožičenja u vozilima, gdje su njegove glavne funkcije prenošenje podataka, slanje upravljačkih signala i isporuka električne energije. Potrošnja bakra u automobilima je u rasponu od 15 kg do oko 30 kg, ovisno o veličini automobila. 30 kg bakrenog ožičenja u automobilu odgovara otprilike 5 km duljine korištenih žica. Očekuje se da će se masa bakra u automobilu povećati u narednim godinama zbog nužnosti uvođenja novih tehnologija i opreme koja će se implementirati. Zato smanjenje mase i veličine žičane mreže također mogu donijeti prednosti [9].

2. ELEKTRIČNI VODIČI I IZOLATORI

Tvari se s obzirom na svojstvo provode li električnu struju ili ne, dijele na električne vodiče i izolatore. Električni vodiči su materijali u kojima postoje slobodni nositelji električnog naboja, pa zbog toga dobro vode električnu struju. Električna vodljivost metala temelji se na građi njihovih atoma metala, odnosno na lakoj pokretljivosti elektrona vanjske elektronske ljuske, koji se pod djelovanjem sile mogu usmjereno gibati. Da bi se utvrdilo je li neka tvar električni vodič ili izolator, potrebno ju je npr. spojiti u strujni krug: ako žaruljica svijetli, znači da ta tvar provodi električnu struju. Svojstvo tvari da provodi električnu struju naziva se vodljivost. Najbolju vodljivost imaju zlato, srebro pa bakar i aluminij. Bakar i aluminij koriste se najčešće kao materijali za izradu električnih vodiča, dok su srebro i zlato za to preskupi, ali se uz druge metale i legure upotrebljavaju za električne kontakte, slika 4. Većini električkih vodiča vodljivost se smanjuje zagrijavanjem, odnosno povećava hlađenjem. No postoje i tvari koje se ponašaju obrnuto, ugljen npr., kojemu porastom temperature raste i električka vodljivost te staklo koje je na sobnoj temperaturi izolator, a zagrijavanjem na temperaturu tališta postaje električni vodič. Metali, legure ili oksidne keramike kad se pothlade na izrazito niske temperature, gube električni otpor i postaju idealni vodiči električne struje (pojam poznat kao supravodljivost). Elektroliti, npr. kiseline, lužine i otopine soli, vode električnu struju zahvaljujući pokretljivosti iona. Elektroliti u užem smislu ne spadaju u električne vodiče. Električni vodiči su i tijela građena od električki vodljivih tvari, kao što je npr. žica (zasebna žica ili više žica međusobno upletenih), najčešće načinjene od istoga materijala (to su onda homogeni vodič) ili od više različitih materijala (kombinirani vodič). Žica može biti neizolirana („gola“) ili izolirana, uglavnom je kružnog poprečnog presjeka i u okviru električnog voda žica služi da se električna struja provodi predviđenim putem. Osim žice, kao električni vodič može služiti i šipka, ploča ili traka, kao npr. na gromobranskoj zaštiti [10].



Slika 4. Specifična vodljivost tehničkih materijala [10]

Izolatori su porculan, staklo, kvarc, tinjac (slojeviti silikati, tj. filosilikati), svila, elastomeri, parafin, ulje i čista demineralizirana ili destilirana voda.

I vodiči i izolatori su podjednako važni u svakodnevnom životu, jer se vodiči upotrebljavaju za provođenje električne struje, a izolatori služe za ciljano sprečavanje prolaska struje.

Vodiči se u elektrotehnici javljaju kao:

Goli vodiči - služe za prijenos energije za pogon tramvaja, lokomotiva, dizalica i sl.

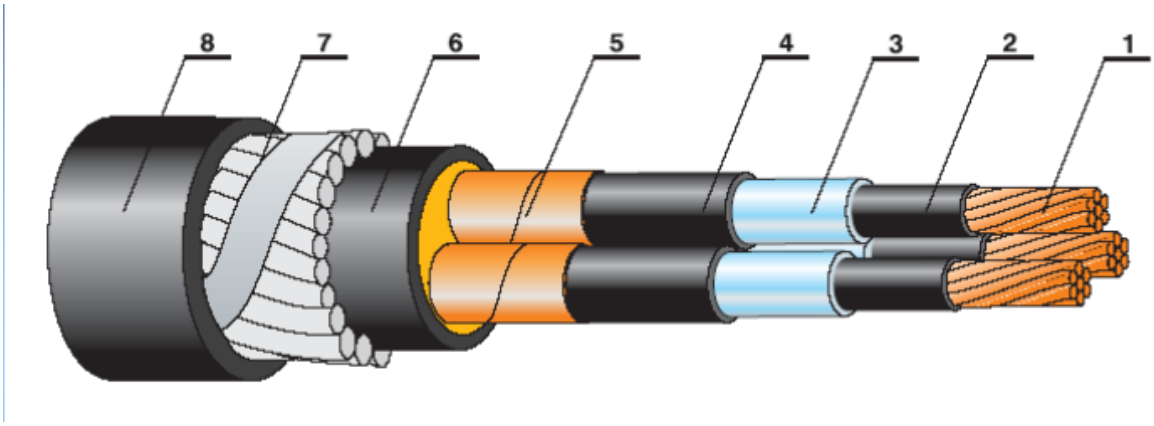
- gola bakrena žica za razvodne kutije, elektroničke uređaje i grijače električnih peći

Izolirani vodiči - lakom izolirana žica za namotaje transformatora i zavojnica

- kablovi s elastomernom izolacijom
- kablovi s izolacijom od PVC-a za ispod žbuke
- svilom izolirana žica, koja se koristi za zavojnice i uređaje slabe struje
- teške ili oklopljene izvedbe uređaja za pogonske (radioničke) radne uvjete [10].

2.1. Električni vodiči i izolatori u automobilima

Žica je naziv za pojedinačni električni vodič, a kabel je naziv za skupinu žica omotanih omotačem. Više vodiča u skupu, ali koji nemaju izolaciju, zapravo se klasificiraju kao jedan vodič. Žica je najčešće načinjena od bakra ili aluminija, slika 5. Prema potrebi radnih uvjeta, vodiči mogu biti vodonepropusni, što se postiže ugradnjom materijala koji u vodenom mediju bubre te na taj način sprječavaju uzdužno prodiranje vode u vodič. Žile kablova izrađuju se postupkom istovremenog ekstrudiranja umreženog polietilena (XLPE) u tri sloja na vodiče u jednoj glavi – sloj poluvodljivog polietilena na vodič, zatim izolacija i još jedan poluvodljivi sloj na samu izolaciju, a slojevi su međusobno vrlo čvrsto zalijepljeni. Pritom prostor između slojeva tijekom proizvodnje nije izložen onečišćenju niti u jednom trenutku. Kad su materijali visoke čistoće u pitanju, potrebno je iznimno čisto okruženje, te se uz primjenu trostruke ekstruzije, suhog postupka umrežavanja i hlađenja garantira visoka kvaliteta proizvoda. Električna zaštita se izvodi helikoidalno omotanim bakrenim žicama sa suprotnom spiralom od bakrene trake. Da bi se postigla uzdužna vodonepropusnost vodiča, ispod i iznad žica omataju se dodatne trake s npr. materijalom koji bubri u vodi ili slični materijali. Poprečna vodonepropusnost postiže se aluminijskom trakom sa slojem kopolimera, koji se prilijepljen na plašt. U specifičnim područjima, npr. zaštite ekrana mogu se ugraditi svjetlovodne optičke niti za podatkovni prijenos ili npr. sustav za praćenje temperature u kabelu tijekom upotrebe. Plašt se obično dobiva ekstrudiranjem polietilena (PE). Prema potrebi, mogu se koristiti i drugi materijali tako da kabel može biti bez halogenih kemijskih elemenata ili vatrootporan. Plašt može biti načinjen i s jednim dodatnim ekstrudiranim vrlo tankim slojem od poluvodljivog materijala (tzv. „skin“), što omogućuje ispitivanje plašta pod naponom, u samoj tvornici, nakon transporta, neposredno nakon polaganja kabla ili kod periodičkih planiranih ispitivanja. Na slici 5. prikazana je konstrukcija kabelskog snopa [11].

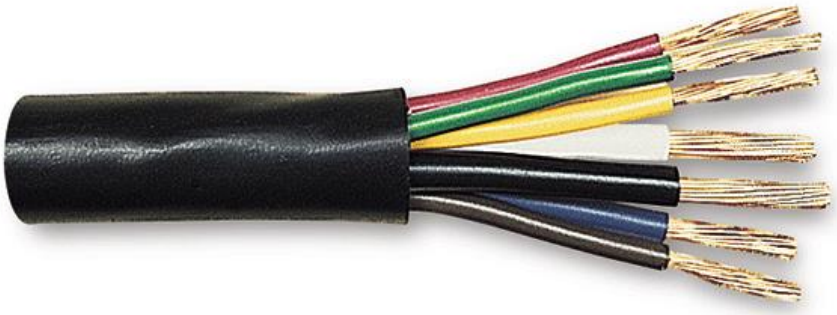


Slika 5. Konstrukcija kabelskog snopa [11]

Opis konstrukcije kabelskog snopa:

1. vodič – bakar ili aluminij
2. zaštita vodiča – poluvodljivi sloj na vodiču
3. izolacija
4. zaštita izolacije – poluvodljivi sloj na izolaciji
5. električna zaštita – od bakrene trake
6. unutrašnji plašt i ispuna od PVC-a
7. armatura od čelične pocinčane okrugle žice i zavojnica od pocinčane čelične trake
8. vanjski plašt od PVC-a.

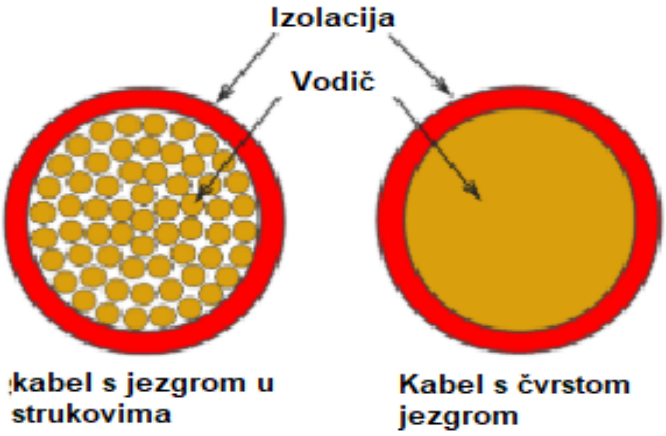
Kabelski snop (engl. *wire harness*) je sklop električnih kabela koji se koristi u automobilima za povezivanje elektroničkih komponenata, upravljačkih jedinica, senzora i aktuatora, slika 6. Pojedinačne žice koje prenose signale i električnu struju povezuju se remenima, kabelskim vezicama, kabelskim kanalima, ljepljivom trakom i slično. Na krajevima kabla nalaze se električne stezaljke („krila“), ponekad su dodane i žičane brtve te su umetnuti u električne priključke, utikače (tzv. „muške“ priključke) ili utičnice (tzv. „ženske“ priključke). Kućišta konektora s mehanizmom za zaključavanje i brtvama koriste se za zaštitu cjelovitosti električnih spojeva od utjecaja okoline, kao što su npr. udarci ili vibracije, vlaga ili voda te prašina. Automobilski kablovi za ožičenje najčešće se europske proizvođače automobila proizvode u zemljama gdje je cijena radne snage niža, poput Rumunjske, Poljske, Tunisa, Maroka itd.



Slika 6. Kabelski snop [12]

Automobilsko ožičenje izazovan je segment automobila kao cjeline. Kvarovi i popravci ožičenja su mnogobrojni: često serviseri nalaze loše spojeve, neispravne žice i sl.

Nikad se ne koristiti čvrsta žica za automobil. Čvrsta žica je pogodna samo za kućne i industrijske namjene. Automobilsko ožičenje mora biti fleksibilno. Navojna žica je fleksibilna, gdje se čvrsta jezgrena žica može savijati, ali ne nebrojeno puta [13]. Razlog za to je taj što je bakar, iako prilično duktilni materijal, osjetljiv na smanjenje žilavosti kada je izložen vibracijama i udarcima, kao što je slučaj kod instaliranja u vozilu. Zbog ovoga bakar postaje krhkiji što može tijekom dugog vremena prouzrokovati puknuće krutih vodiča. Taj se problem rješava proizvodnjom jezgre od mnogih bakrenih žica malog promjera kako bi se dobila željena veličina poprečnog presjeka, a da se pritom ne koristi jedna žica. Ova vrsta kabela je poznata kao „nanizani“ kabel i pruža mnogo veću fleksibilnost, što znači poboljšanu otpornost na otvrdnjavanje, što ga čini pogodnijim za upotrebu u vozilima. Slika 7. prikazuje razliku u presjecima [13].



Slika 7.Presjek električnog kabela s više manjih žica i jednom velikom žicom [13]

2.1.1 Odabir prave veličine žice

Glavno pitanje za ožičenje je dimenzioniranje. Žica se koristi za prijenos električne struje, koliko struje može nositi izravno je povezano s duljinom i debljinom. Signalne žice, poput senzora na računalu, ne moraju biti velikog poprečnog presjeka, jer je jakost struje prilično niska. No za velike aplikacije za napajanje kao što su alternator, električni motori (prozori, brave itd.) i druge velike predmete potrebne su veće žice. Kako se udaljenost od izvora povećava, mora se povećati i promjer, a tu je i problem pada napona. Premalom debljinom kabela generirat će se toplina u kablu, a prevelikom trošit će se nepotrebno novac na bakar.

U Europi se metričke veličine koriste za kablove i izražavaju se kao ukupna površina presjeka vodiča zajedno s brojem žica i njihovim promjerom, slika 8. Na primjer, kabel naveden kao 2,0 mm² 28 / 0,30 označava da ima ukupni površinski presjek vodiča 2,0 mm², a sastoji se od 28 pojedinačnih žica (finožični vodič) promjera 0,3 mm.

U Sjevernoj Americi AWG standard se najčešće koristi za napleten kabel i izražava zajedno s brojem žica i njihovom mjerom. Na primjer, kabel specificiran kao 16 AWG 7/24 ima veličinu presjeka 16 AWG i sastoji se od 7 pojedinačnih žica, svaka od 24 AWG, pri čemu je AWG kratica od engl. *American wire gauge* (AWG), gdje je npr. 16 AWG jednako 1,5 mm2. Što je veći broj AWG, to je manji poprečni presjek žice.

Kako se smanjuje masa i veličina automobila tako se pokušavaju smanjiti i veličine žica. Raspon veličine žica kreće se od 0,35 mm² do 120 mm². Trenutno se testiraju i žice presjeka 0,13 mm² i 0,17 mm^2 [14].



Slika 8. Različite veličine električnog vodiča [14]

2.1.2. Materijali vodiča (žice)

Od čega je izrađena žica jednako je važno. Bakar je uvijek najbolji za bilo koju električnu upotrebu, ali bakar je skup, tako da postoje neke druge mogućnosti, uključujući aluminij i aluminij obložen bakrom. Dvije glavne vrste žica su bakar bez kisika (OFC, od engl. *Oxygen-free copper*) i aluminij obložen bakrom (CCA, od engl. *Copper clad aluminium wire*). Aluminij provodi oko 40 % manje električne energije u odnosu na bakar. To znači da ožičenje mora biti veće i da će se zagrijavati više. Aluminij ima također lošu korozijsku postojanost, koja se ubrzava protokom električna struje. U kombinaciji s vlagom u zraku, započinje korozija, što smanjuje vodljivost aluminija. Kad se otvori kabel i vidi da je pokriven bjelkastim prahom, to može se prepoznati korozija vodiča. Korozija se može dogoditi i bakru, ali treba mnogo duže, a rezultati su zeleno nijansiranje žice [15].

Osim čistog bakra, obrađuju se i razne legure bakra za posebne primjene. Postoje legure bakra i srebra (min. 0,08 %, maks. 0,12 %), legure bakra i magnezija (min. 0,14 %, maks. 0,26 %), legure bakra i kositra (min. 0,25 %, maks. 0,35 %). Glavni kriteriji za uporabu legura bakra su: dobra topljivost, učinkovita zaštita od korozije, otpornost na visoke temperature, dobra površinska vodljivost, visoka otpornost na koroziju i temperaturu.

2.1.3. Materijali izolatora

Izolacijski materijali moraju pružati visoku pouzdanost i trajnost u radnim uvjetima. Polivinil-klorid (PVC), polietilen (PE), poliamid (PA), polipropilen (PP) su polukristalni polimeri, imaju viskoplastična svojstva u rasponu radne temperatura, plastično duktilni su na temperaturama iznad granice prinosa, te spadaju u skupinu plastomera. Plastomerna izolacija može se rastaliti dovodom topline, mijenjajući oblik kabla. PVC izolacije automobilskih žica koriste se kod: ožičenja općeg kruga do 80 °C, automobilskih žica bez olova gdje je tanka stijenka do 105 °C, automobilskih vrata do 80 °C i sl. [16]

Plastomerni poliuretan (TPE – U) i plastomerni poliolefin elastomer (TPE – O) imaju mekane i tvrde dijelove, elastična svojstva u rasponu radne temperature i spadaju u termoplastične elastomere.

Polietilen (PE) ima elastična svojstva s visokom reverzibilnom deformabilnošću u rasponu radne temperature i nema termoplastičnih svojstava – umrežena struktura zadržava se do temperature raspadanja, tj. znatno iznad radne temperature.

Umrežena izolacija nastaje istiskivanjem polietilena kroz malznicu, pod toplinom i pritiskom, kako bi se materijal umrežio. Umrežena automobilska žica može podnijeti puno veće temperature od PVC automobilskih žica, koje idu preko 125 ºC.

Zahtjevi za izbor automobilskih žica su: ispitivanje i razvoj materijala izolacije ovisi o specifikacijama kupaca ili nacionalnim i međunarodnim standardima, a optimizacija svojstava u skladu je s promjenjivim ili novim zahtjevima. Na izbor utječe i redovita kontrola kvalitete u obliku revizija proizvoda.

Kriteriji odabira su: temperatura rada, električne vrijednosti, fleksibilnost, tvrdoća, mehanička stabilnost pod opterećenjem, otpornost na trošenje, otpornost na ulje, goriva, kočnu tekućinu, kiseline, lužine, organske tvari i sl.

Leoni je vodeći proizvođač kablova i vodiča za automobilsku industriju i napredovao je do najvećeg i najuspješnijeg svjetskog dobavljača. Još su poznati proizvođači Tyco Electronics Connectivity, Acome, Gebauer Grilleri i Prysmian Draka.

2.4. Recikliranje kabela

U proizvodnji kabela korišteni su različiti tipovi obojenih metala poput aluminija, olova, bakra. Ima smisla koristiti stare energetske kabele za recikliranje metala. To je ekonomski isplativo i nije toliko destruktivno za prirodni okoliš kao primarna proizvodnja metala. Spaljivanjem polimera, ponajprije PVC-a nastaje otrovni plin dioksin.

U našoj zemlji već postoje i aktivno se koriste linije za recikliranje metalnog otpada iz kablova. Primjer je tvrtka Spectra Media u Donjoj Bistri.

Aluminijski kabeli koriste se za vanjsku primjenu prijenosa električne energije, a bakrena žica za unutarnju primjenu. Bakreni vodiči se uobičajeno rabe i u građevinarstvu, prometu, elektronici i automobilima. Kao izolacije se najčešće koriste PVC, PE i umreženi polietilen. U Europi i Japanu PVC se koristi dvostruko više od polietilena. U Sjedinjenim Američkim Državama koristi se podjednako.

Postupci recikliranja kabela su: sjeckanje, guljenje i pothlađivanje.

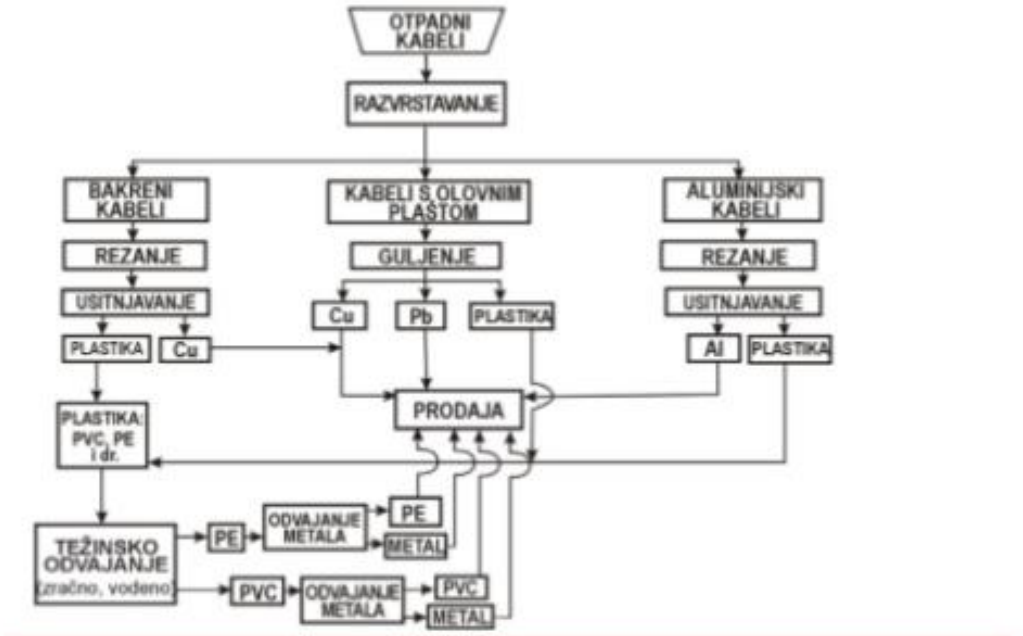
Prvi postupak pri recikliranju kabela je prerada sjeckanjem. Postoje dvije vrste postrojenja s obzirom na kapacitet prerade. Pogoni malog kapaciteta mogu usitniti od 225 do 680 kg/h i njihova cijena iznosi oko 150 000 američkih dolara. Pogoni velikog kapaciteta usitnjavaju od 4770 do 5455 kg/h i njihova vrijednost je do 1 800 000 američkih dolara. Druga faza je grubo razvrstavanje kabela prema duljini, vrsti izolacije, promjeru, sastavu materijala i dr. Dugački se kabeli prvo režu na oko 1 m, a zatim usitnjavaju u manje komade. Sjeckanje je prvi korak u smanjenju dimenzija komadića kabela. U odnosu na usitnjavanje rezalicom („shredderom“), sjeckanje stvara manje prašine i ne zahtijeva filtre. Sjeckanjem se postiže samo djelomično usitnjavanje, pri čemu je uklonjeno samo dio izolacije i plašteva. Duljina kabela iznosi oko 7 do 8 cm. Usitnjavanje je sljedeća faza kojom se usitnjuju komadići do 0,6 cm duljine. Iako se od tako usitnjenih kabela lako odvaja izolacija, u odvojenoj oblozi zaostaju i male količine metala. Što su sitnije čestice bolje je razvrstavanje komponenti. Prosijavanje je sljedeća faza gdje se koriste vibracijska sita kako bi se čestice što bolje pripremile za krajnje razdvajanje metala. Pri tome čestice metala, polimera, vlakna i prašine propadaju kroz donje sito. Metalne čestice propadaju, a lakše nemetalne potlak povlači prema gore. Prašina se odvaja primjenom zračnog vrtloga. Na izlazu u okoliš se nalaze filtri koji pročišćavaju zrak. Težinsko razdvajanje je zadnja faza u preradi sjeckanjem. Preostale usitnjene čestice koje ostaju na situ odvode se na ploču za propuhivanje koja je nagnuta u dva smjera. Lakše čestice tjerane strujom zraka se

potiskuju na uzdignutu stranu ploče, dok se teže čestice spuštaju na drugoj strani ploče. Drugi način je odvajanje metala i drugih čestica pomoću tekućine. Srednja frakcija se vraća u prethodnu fazu prerade. Udio metala u neiskorištenom ostatku je do 15 %. Plivajuće – taložna metoda, cik – cak zračna metoda, vodeni ciklon i elektrostatičko odvajanje su još neki postupci koji se koriste za odvajanje komponenti iz otpadnih kablova, slika 9.

Sljedeći postupak recikliranja kabela je prerada guljenjem. Guljenje je jeftinije i prihvatljivije za okoliš, ali manje učinkovito i veća je čistoća odvojenog metala i polimera. Postojeća oprema omogućava obradu samo jednožilnih kabela. Kapaciteti prerade su do 60 m/min ili 1100 kg/min, a koriste se kabeli promjera od 1,6 do 150 mm. Cijena uređaja kapaciteta 24 m/min kreće se oko 5000 američkih dolara. Ovaj postupak se koristi u mnogim zemljama, pogotovo manje razvijenim jer su uređaji jeftiniji od postrojenja za sjeckanje.

Treći postupak recikliranja kablova je pothlađivanje kojim se dobiju metalni i polimerni otpad visoke čistoće. Primjenom tekućeg dušika kabelski se otpad pothlađuje pri čemu se polimerne frakcije iako odvajaju od metala. Udarnim djelovanjem se PVC postaje krhak, lomljiv, te se lako razlomi u veliki broj sitnih čestica, dok se PE i neki drugi polimeri ne lome. Na taj se način postiže visoka čistoća polimernog otpada.

Ovaj je postupak skuplji zbog povećanog utrošak energije i skupljeg postrojenja, tako da nije široko primjenjiv [17].



Slika 9. Tokovi materijala u postupku prerade kabelskog otpada [17]

Izdvojene frakcije su sekundarna sirovina. Reciklirani materijal se naziva reciklat. Reciklat kod pothlađivanja kablova je visoke čistoće i dalje se koristi u primarnoj proizvodnji metala, npr. u ljevaonicama te slijedi postupak recikliranja ili energetske oporabe polimera, slika 10.



Slika 10. Bakrene granule nakon procesa recikliranja kabela [11]

3. TERMINALI

Terminali su još jedna nužna komponenta za uspostavljanje elektroničke ili električne veze u kabelskom snopu. Terminali se definiraju kao uređaj konstruiran za zaustavljanje vodiča koji će se pričvrstiti na drugi terminal, konektor itd. radi uspostavljanja električne veze. Terminal je električni spoj bez lemljenja i koristi se za prekid namotane žice umetanjem uklopljenog kraja žice u dio terminala. Ovaj je terminal zatim sabijen oko žice, zbog čega je nepropustan za plinove. Preklopna krila terminala oko žice imaju ovalni oblik, dok preklopna krila terminala oko izolacije imaju oblik slova V ili U. Terminali su obično od metala ili legura, ali koriste se i drugi provodljivi materijali, poput ugljika ili silicija.

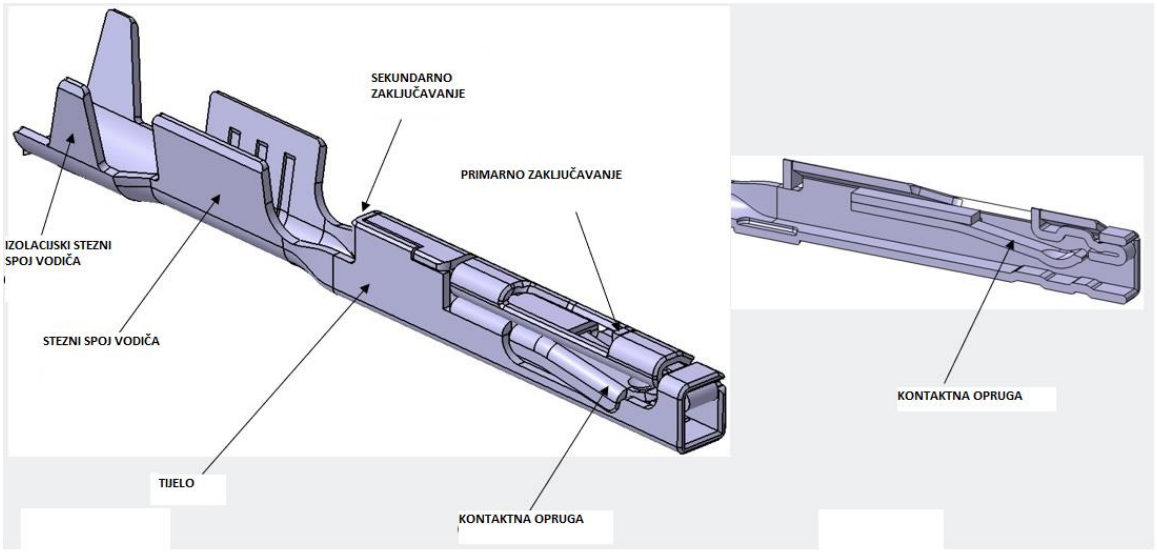
Odabir terminala ovisit će o konstrukciji i primjeni. Žičani terminali dostupni su u izoliranom i neizoliranom obliku. Izolacija žice štiti žicu od vode i vlage, kao i od ekstremnih vrućina ili hladnoće. Ako nije potrebna zaštita od okolišnih uvjeta, neizolirani terminali pružaju mnogo veću ekonomsku vrijednost svojim niskim troškovima.

Terminali se izvode u različitim oblicima i veličinama, ovisno o veličina žice i konektora.

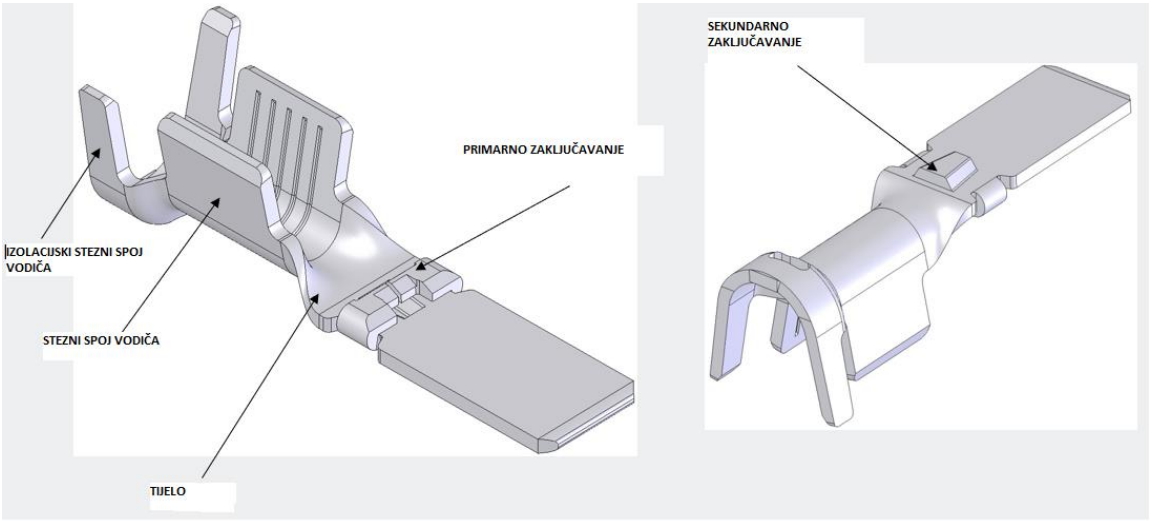
Pojam konektor se obično odnosi na polimerni dio na koji se spaja terminal i tako rezultira mehaničkom vezom.

Terminali mogu biti napravljeni u jednom dijelu ili dva. Mogu biti muški i ženski terminali ovisno o pinu.

Jednodijelno tijelo terminala konstruirano je tako da se žica proteže kroz zonu izolacijskog steznog spoja vodiča i zonu steznog spoja vodiča i dođe do kontaktne zone. Povezivanje ženskog terminala i muškog terminala je preko kontaktne opruge. Ovo tijelo mora imati značajke za primarno i sekundarno zaključavanje, slika 11 i 12.

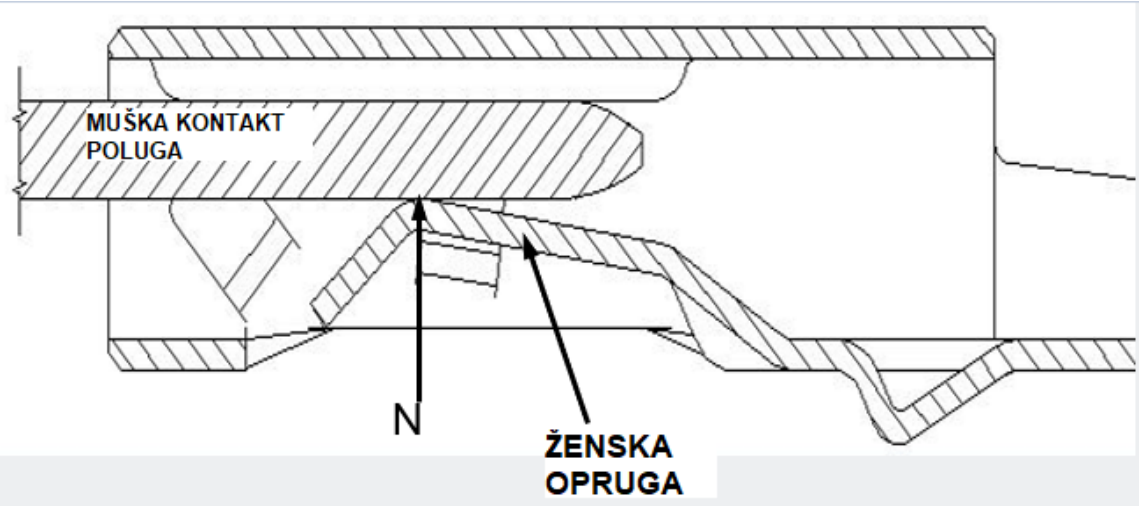


Slika 11. Jednodijelni ženski terminal [18]



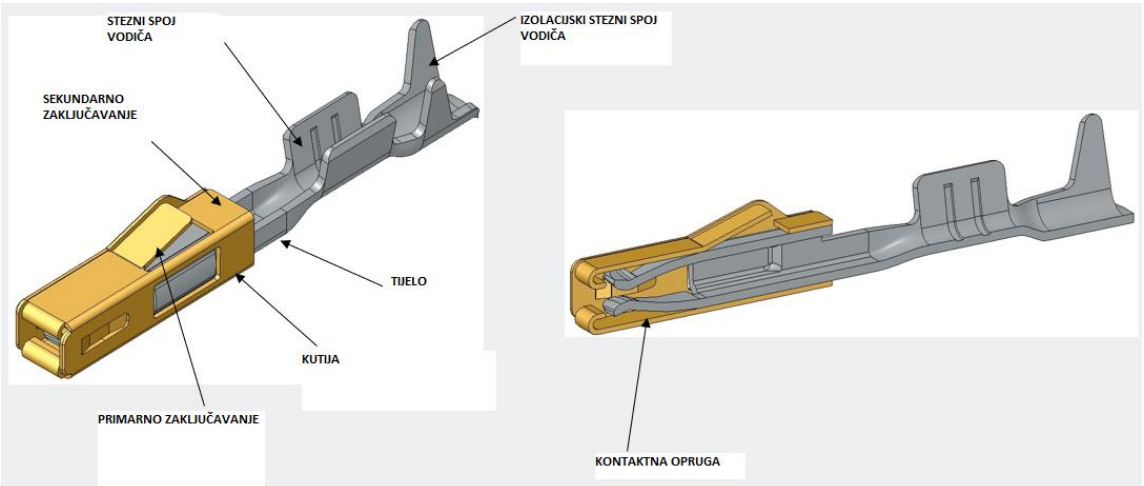
Slika 12. Jednodijelni muški terminal [18]

Normalna sila (ili kontaktna sila) u izvedbi terminala definira se kao opterećenje koje ženska terminalna opruga postavlja na mušku oštricu u primarnoj točki (kontakt), slika 13.

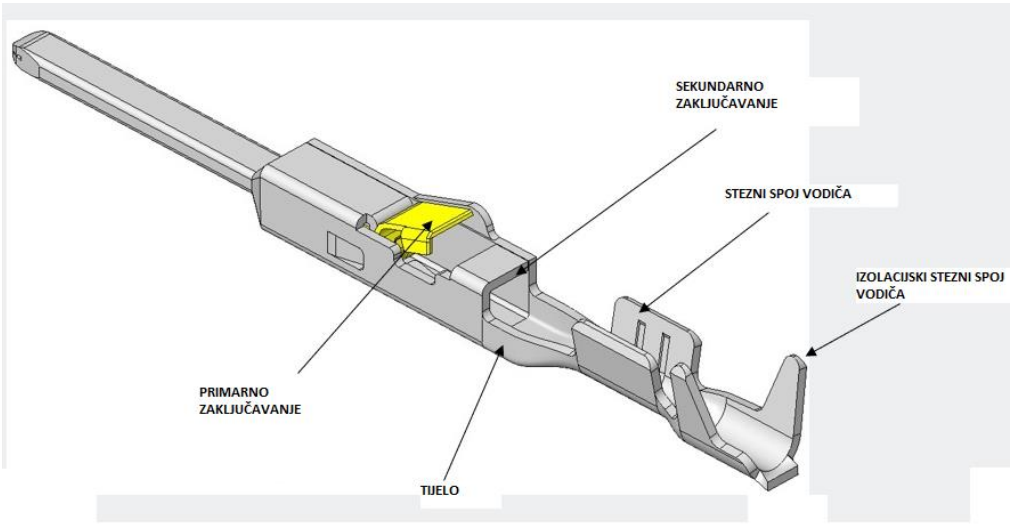


Slika 13. Presjek kontakta (spoja) muškog i ženskog terminala [18]

Kod dvodijelnog terminala tijelo povezuje žicu preko zone izolacijskog steznog spoja vodiča i zone steznog spoja vodiča te se ženski terminal spaja na muški terminal preko kontaktne opruge. Kutija ima mogućnosti primarnog i sekundarnog zaključavanja. Pored toga kutije štite kontaktne opruge i preuzimaju teret od kontaktnih opruga stvorenih nakon umetanja muškog pina (jezika), slika 14 i 15.



Slika 14. Dvodijelni ženski terminal [18]



Slika 15. Dvodijelni muški terminal [18]

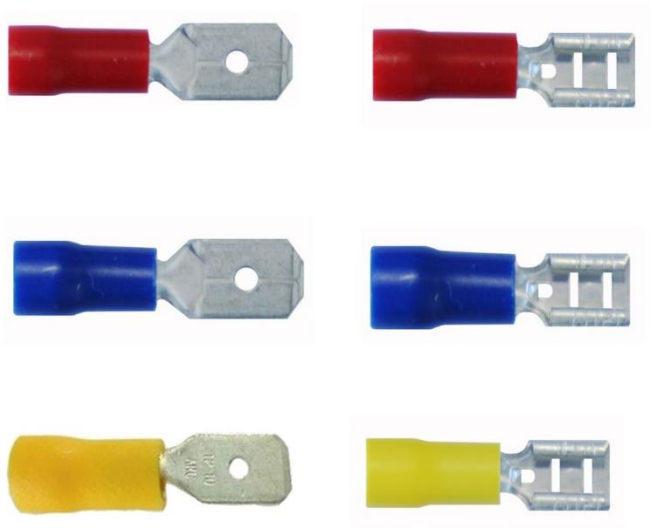
Najčešće korištene vrste terminala su: prstenasti terminali (engl. *ring terminals*), pritisni terminali (engl. *push on terminals*) i metak terminali (engl. *bullet terminals*).

Prstenasti terminali konstruirani su za spajanje, povezivanje ili prekid pojedinačne žice, slika 16. Struktura prstena na kraju priključka omogućava sigurno priključivanje terminala na vijak ili zavrtanj. Svaki terminal sadrži jedinstveni skup karakteristika. Može biti u obliku toplinskih izolacija, poliamidnih izolacija, PVC-izolacija, neizoliranih i visoko temperaturnih terminala. Prstenasti terminali izolirani PVC-om su najčešći, jeftini izolirani prstenasti terminali se lako stisnu i pružaju izolirani pokrov preko komprimiranog područja. Prstenasti terminali s poliamidnim izolacijama su terminali izolirani s većom izvedbom. Poliamidna izolacija omogućuje fleksibilniji spoj otporan na povećane temperature. Visokotemperaturni terminali za prstene konstruirani su za električne spojeve koji su izloženi višim temperaturama koje bi mogle uzrokovati kvar drugih prstenastih terminala. Napravljen je od legiranog čelika i može raditi na temperaturama do oko 480 °C. Zbog viših temperatura, ove stezaljke (krila) prstena treba samo presavijati i ne treba lemiti. Budući da su visokotemperaturni prstenasti terminali napravljeni od čelika, njima je potrebno puno više sile za prešanje od standardnih prstenastih terminala. Uobičajene uporabe za visoko temperaturne prstenaste terminale uključuju električne priključke za senzore ispuha, razdjelnike, grijače i grijaće elemente, pećnice, sušilice i drugo. Namijenjeni za uporabu u električnim vezama do 600 V. Neizolirani prstenasti terminali mogu se presaviti ili lemiti [19].



Slika 16. Prstenasti terminali [20]

Pritisni terminali su brzi žičani priključci koji se isporučuju u veličinama od standardne širine 6,3 mm do minimalne širine od 2,8 mm. Pritisni terminali dolaze u muškoj ili ženskoj konfiguraciji, slika 17. Neizolirani pritisni terminali izrađeni su od bakra i s toplinskim skupljanjem koriste se za izoliranje žice nakon obrade. Visokotemperaturni pritisni terminali izrađeni su od čelika s prevlakom nikla i mogu izdržati temperature do 500 ºC. PVC pritisni terminali imaju PVC izolaciju oko cijevi koja štiti od kratkog spoja. Poliamidni izolirani pritisni terminali su pokositreni bakreni terminali koji koriste izdržljivi poliamid kao izolator, pružajući viši stupanj zaštite od standardne PVC izolacije. Poliamidni pritisni terminali mogu biti potpuno ili djelomično izolirani.



Slika 17.Muški i ženski pritisni terminali [21]

Metak terminali okrugli su ženski i muški terminali koji se međusobno spajaju radi spajanja ili prekida žičane veze, slika 18. Okrugli muški terminal posebno je konstruiran za povezivanje sa šupljim karoserijskim ženskim terminalom iste veličine. Spajanje muškog i ženskog terminala stvara sigurnu i kvalitetnu vezu. Stezaljke (krila) unutar metak terminala izrađene su od čistog elektrolitičkog bakra koji je toplinski očvrsnut, što rezultira spajanjem spoja prilikom prešanja. Ova spojena veza omogućuje maksimalnu čvrstoću i vodljivost. Veličina metak terminala kreće se od 3,9 mm do 4,6 mm. Dostupne vrste izolacije uključuju toplinsku izolaciju, PVC i poliamidnu izolaciju. Toplinska izolacija u potpunosti brtvi terminal i najtrajnija je vrsta izolacije za priključke. Brtva će zaštititi metak terminal od korozije i oštećenja uslijed vlage, te će imati veću čvrstoću u usporedbi s PVC ili poliamidnim terminalima. Metak terminali s izolacijom od PVC-a su najekonomičniji [22].



Slika 18. Muški i ženski metak terminali [23]

4. STEZNO SPAJANJE VODIČA

Stezno spajanje vodiča (prema engl. *crimp* kolokvijalni izrazi su „krimp“ i „krimpanje“) je vrsta spajanja bez lemljenja, slika 19. Stezno spajanje terminala i žice je proces u kojem se jedan dio izolacije kabla uklanja, a žice postavljaju u metalni terminal, slika 18. Učinkovite veze steznog spajanja deformiraju metalni terminal preko granice razvlačenja, tako da tlačno deformirana žica izaziva naprezanja u okolnom terminalu, a te se naprezanja suprotstavljaju jedna drugima čime drže kabel na mjestu. Tako se osigurala dobra električna povezanost i mehanička čvrstoća na spojnicama. Zbog elastične prirode metala u steznim spojevima, stezni spojevi su vrlo otporni na vibracije i toplinski udar. Dobro konstruiran i dobro izveden stezni spoj vodiča dizajniran je tako da bude nepropustan za plin, što sprečava da kisik i vlaga dođu do metala (koji su često različiti metali) i uzrokuju koroziju. Zbog toga što se za spajanje ne koristi legura (kao kod lemljenja), spoj je i mehanički čvršći. Stezni spojevi mogu se koristiti za kabele malih i velikih poprečnih presjeka. Stiskanje žica za postizanje sigurnog spoja jedan je od najvažnijih izazova za tiskane pločice, automobile, zrakoplovstvo, satelite i telekomunikaciju. Moderni automobili sadrže nekoliko tisuća steznih spojeva vodiča. Stezno spojeni terminali su izloženi raznim vrstama vibracija, različitom električnom okruženju, temperaturnom gradijentu i slično, te se većina, oko 60 %, električnih kvarova u automobilu događa u steznim spojevima. Kompresija korištenjem konvencionalnog alata za stezno spajanje snižava mehanička svojstva metala, povećava električni otpor i uzrokuje znatne gubitke u sustavu ožičenja. Savijanje terminala većeg promjera uvijek je problem zbog opružne stražnje strane terminala kada se izvodi uobičajenim alatom za stezno spajanje. Manja čvrstoća spojeva, slaba površinska obrada i pukotine preko terminala još uvijek su glavni tehnološki problemi u proizvodnji kabela [24].

Tri ključna elementa u procesu steznog spajanja su terminal, žica i alat.

Terminal

Za većinu primjena, proizvođačima konektora nije isplativo konstruirati terminal koji prihvaća jednu veličinu žice, samo jednu žicu i jedan promjer izolacije. Većina terminala oblikovani su tako da mogu prihvatiti mnoštvo različitih žica i niz promjera izolacije.

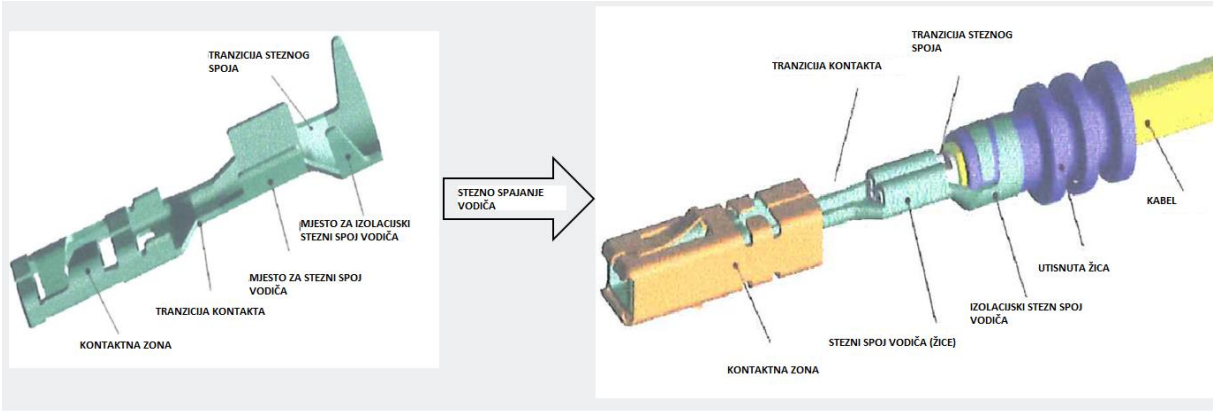
Žica

Navoj žice i vrsta izolacije mogu se uvelike razlikovati unutar jedne veličine žice. Žice mogu biti od bakra, kositra, te s premazom ili bez njega. Materijali za izolaciju žice i debljina razlikuju se od primjene do primjene.

Postavljanje alata

Koju vrstu alata zahtijeva primjena? Zahtijeva li se uklanjanje žice ručni rad ili je moguć i automatski postupak? Sve ove opcije uključuju različite razine varijabilnosti. Terminal, žica i vrsta alata za stezno spajanje utječu na kvalitetu steznog spoja vodiča. Stezno spajanje izolacije pridržava žicu da bi se smanjili učinci vibracija i pomicanje žice u steznom spoju.

Odabir terminala, žice i kriteriji steznog spajanja definira konstruktor, čime su i dimenzije alata potpuno zadane.



Slika 19. Stezno spajanje vodiča [18]

4.1. ALATI ZA STEZNO SPAJANJE VODIČA

Alat za stezno spajanje vodiča deformira žice i terminale na način koji im omogućuje hladno spajanje. U radionicama tehničari često spajaju žice lemljenjem. Alat za stezno spajanje žica samostalni je alat, bez potrebnih drugih složenih alata. Upotreba alata za stezno spajanje osigurava trajnu vezu vodiča koja dugoročno ispravno funkcionira.

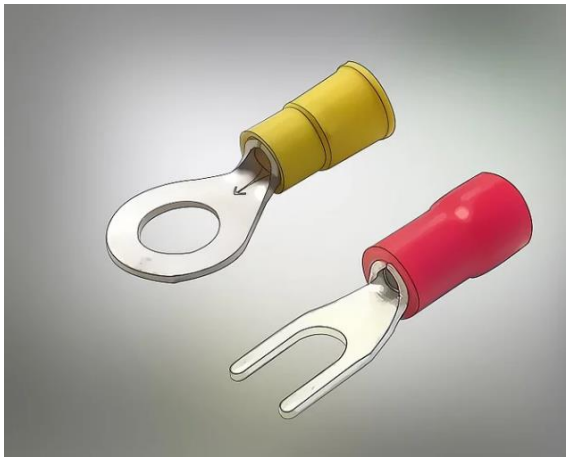
4.1.1. Ručni alat za stezno spajanje vodiča

Ručni alati mogu se koristiti za stezno spajanje raznih finožičnih vodiča. Ručni alati vrlo su prikladni za rad na terenu.

Upotreba ručnog alata za stezno spajanje vodiča

1.Odabrati ispravan terminal za projekt, da bi stezni spoj vodiča ispravno funkcionirao.

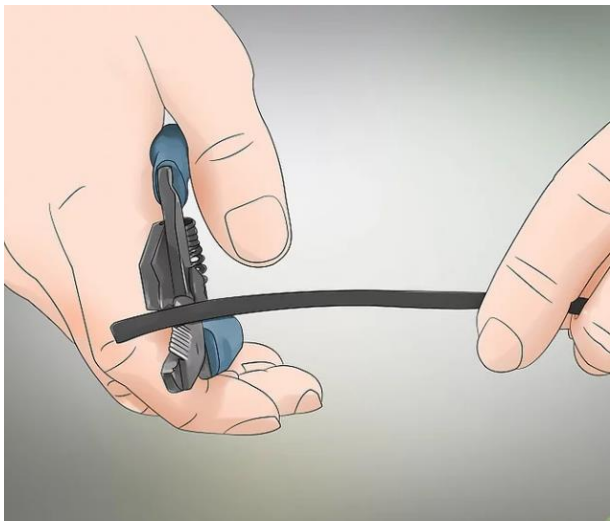
Na primjer, može se kupiti prstenasti terminal koji je konstruiran za projekte visokih vibracija ako se želi dodati neki digitalni uređaj na motocikl. Može se i koristiti vilinski terminal, konstruiran za nevibrirajuću opremu za stezno spajanje žica. Zatim, potrebno je koristiti spojnicu, vrstu terminala, da bi se spojilo dvije žice zajedno.



Slika 20. Odabir ispravnog terminala za stezno spajanje vodiča [26]

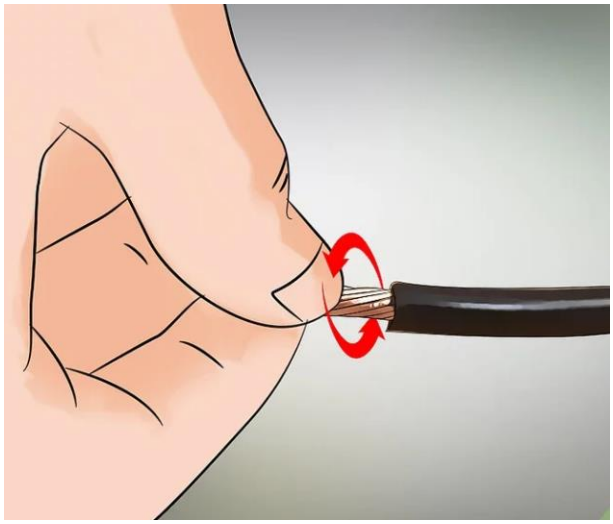
2.Skinuti izolaciju sa žice. Duljina žica ne smije biti viša od duljine terminala. Dakle, ako terminal ima duljinu 0,64 cm, potrebno je ukloniti izolaciju u duljini od 0,64 cm.

Alat za stezno spajanje vodiča može imati segment alata namijenjen za skidanje izolacije. Potrebno je umetnuti žicu u odgovarajuće mjesto za skidanje izolacije i lagano pomicati kliješta kako bi se perforirala izolacija, slika 21.



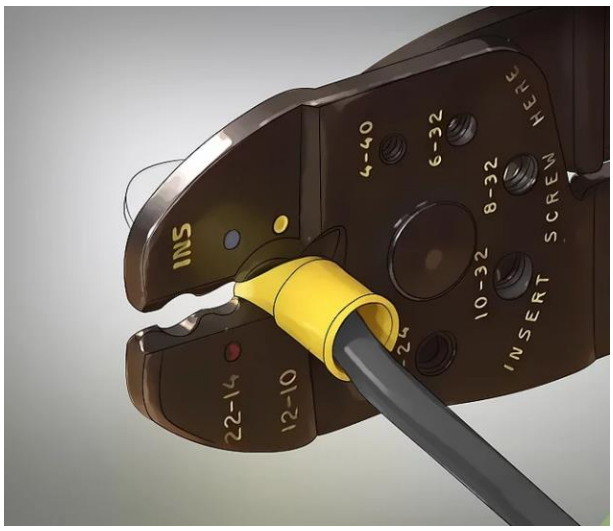
Slika 21. Skidanje izolacije sa žice [26]

3. Prstima uvinuti žice. Uvijanje žica u struk olakšava klizanje u terminal. Također pomaže u stvaranju jačeg spoja. Nakon uvijanja, žice je potrebno uvesti u terminal, slika 22.



Slika 22. Uvijanje žice [26]

4.Sljedeći je korak umetanje terminala u odgovarajuće mjesto alata za stezno spajanje vodiča. Neki alati za stezno spajanje vodiča isporučuju se s bojama koje se podudaraju s uobičajenim bojama priključaka. Drugi alati isporučuju žičane mjerače utisnute na alat kako bi vam pomogli odabrati ispravno mjesto. Zatim, alat za stezno spajanje potrebno je što moguće jače stisnuti da bi se dobio čvrst, dugotrajan spoj.



Slika 23. Stezno spajanje terminala i kabela ručnim alatom [26]

4.1.2. Aplikatori

Aplikator se najbolje opisuje kao „srce postupka steznog spajanja vodiča“. Terminalni aplikator za stezno spajanje vodiča određuje oblik mehaničke veze između žice i terminala. Svaki je aplikator individualno konstruiran za posebne terminale. Visina steznog spajanja žice i terminala i visina steznog spajanja žice i izolacije mogu se prilagoditi za prilagodbu različitih veličina žica i raspona izolacije. Aplikator je također konstruiran za prihvaćanje paketa s modularnim dodavanjem. Aplikator se može koristiti u raznim strojevima, pod uvjetom da stroj ima odgovarajuću dužinu hoda i svu potrebnu opremu.

Traka s terminalima mora biti ubačena u aplikator, s krilima za stezno spajanje za žicu okrenutim prema van, između prednje (vanjske) i stražnje (unutarnje) vodilice traka.

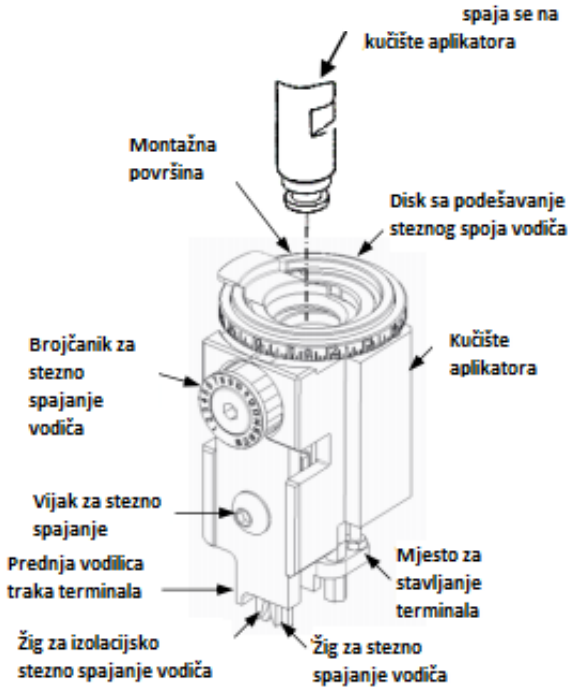
Unutarnji stup postolja nalazi se odmah ispod diska za podešavanje steznog spajanja žice. Disk za podešavanje steznog spajanja žice konstruiran je s oprugom što čini mehanizam za podešavanje preciznih koraka za podešavanje visine steznog spajanja od 0,01 mm i ukupno raspon podešavanja 1,50 mm. Zakretanjem diska, stup aplikatora se podiže i spušta u odnosu na kućište aplikatora. Oznaka crtica na postolju ukazuje na brojke na vanjskom promjeru diska za podešavanje steznog spajanja žice, što ukazuje na relativnu visinu steznog spajanja. Za

ispravnu visinu steznog spajanja, broj na disku za podešavanje steznog spajanja žice mora odgovarati broju na identifikacijskoj oznaci i zapisniku aplikatora.

Žig za žicu se drži u unaprijed postavljenom položaju pomoću postolja i vijka. Žig za izolaciju i prednji depresor smicanja također je pridržan vijkom za stezno spajanje. Žig izolacije se može slobodno kretati gore-dolje da se visina steznog spajanja izolacije može prilagoditi brojčaniku izvlačenjem opružnog kotača lagano i rotirajući na drugi broj.

Žig za stezno spajanje je precizno obrađen, poliran i kromirane površine, što smanjuje trenje i sprječava adheziju terminala na žig. Materijal žiga je legirani alatni čelik.

Terminali na trakama s dvostrukim nosačem zahtijevaju dodatni depresor smicanja, stražnji nosač žiga i stražnji pokretni žig. Ovi dijelovi su pričvršćeni na sklopljeno tijelo aplikatora. Stražnji depresor smicanja gurnut će stražnji pokretni žig prema dolje za rezanje terminala sa stražnje strane trake s terminalima, a pridržavanje terminala će spriječiti podizanje terminala tijekom postupka steznog spajanja i smicanja. Na osnovnoj ploči montirani su stražnji pokretni žig i stražnji nosač žiga [27].



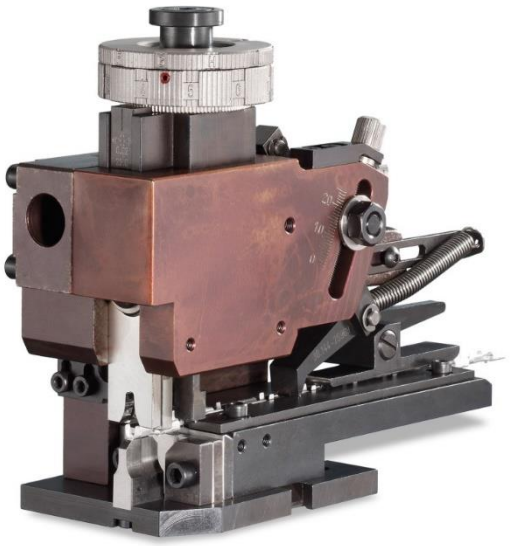
Slika 24. Dijelovi aplikatora [27]

Montažna površina aplikatora je osnovna ploča. Nakovanj, prednji držač žiga, stražnji nosač žiga (ako se koristi), potporni nosač, blok za guljenje vodiča i kućište aplikatora postavljeni su

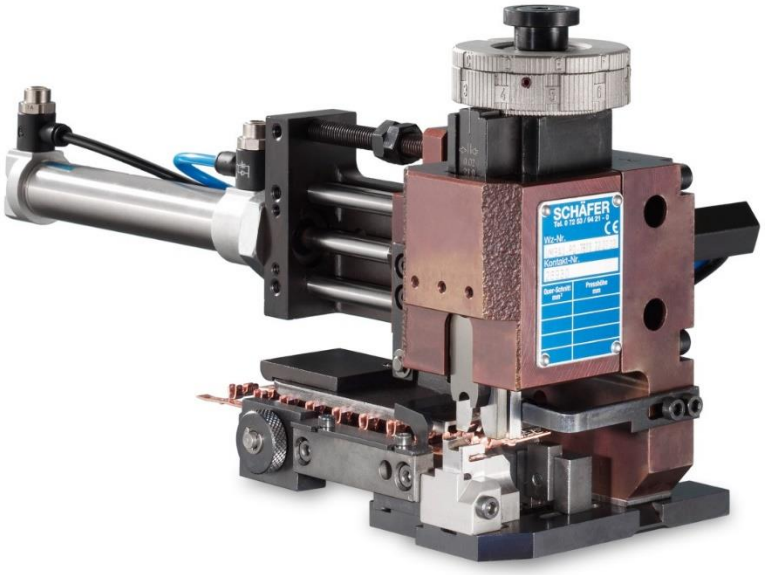
na osnovnu ploču. Ploča za vođenje guljenja vodiča pričvršćena je na blok za podešavanje vodiča trake. Duljina vodilice i vodiči prednjih i stražnjih traka su montirani na vodilici ploče.

Aplikatori su dostupni s mehaničkim sustavom dovoda zraka. Pomoću mehaničkog aplikatora, na terminale djeluje potisni mehanizam i niz šipki i poluga. Dostupne su dvije dovodne cijevi koje se mogu montirati u dva različita ugradbena otvora ovisno o duljini hoda stroja i vrsti doziranja. Rezervni dodatak za dovod, kada se ne koristi, može biti montiran na kućište aplikatora na mjestu skladištenja rezervnog utora za napajanje.

Kod aplikatora s dovodom zraka, mehanički dovodni mehanizam za dovod i njegov mehanički sustav šipki, poluga i opruge zamjenjuju modul zračnog cilindra. Na početku silaznog hoda postolja, poluga postavljena na postolje gura pritisni štap. Na taj se način aktivira ventil unutar kućišta dovoda zraka, što uzrokuje povlačenje cilindra (strana najbliže ulaznoj strani nakovnja) koja se puni, premještajući držač za dovod u stražnji dio vodilice.

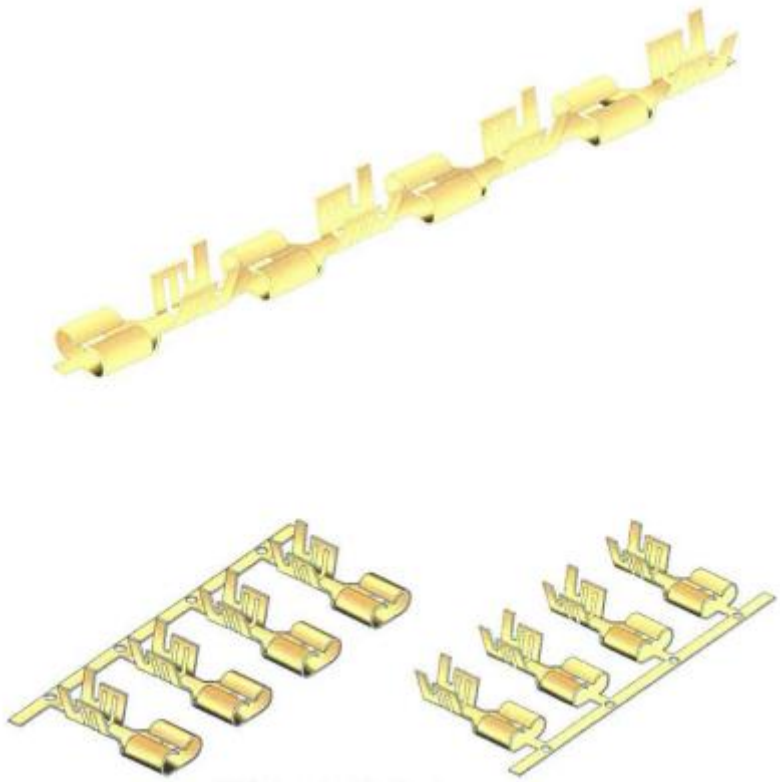


Slika 25. Aplikator s mehaničkim sustavom dovoda [28]



Slika 26. Aplikator s pneumatskim sustavom dovoda [28]

Većinom su aplikatori napravljeni da im traka s terminalima dolazi s bočne strane, ali može se dogoditi da dođe i s prednje strane.



Slika 27. Traka s terminalima koja dolazi s prednje strane aplikatora (gore) i s bočne strane (dolje) [18]

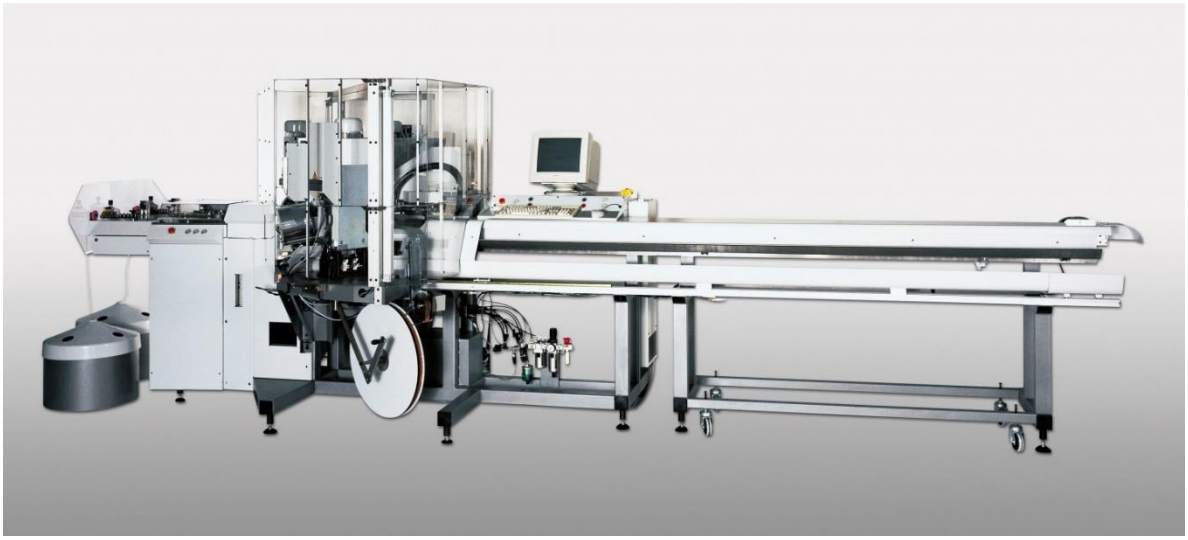
Budući da napredak u automatizaciji i dalje podiže svoje mogućnosti kao što su alati koji bi radili cijelo vrijeme, ukupni trošak steznog spajanja na žicama postaje presudan faktor kod konstruiranja uspješnih rješenja za stezno spajanje žica za terminale bez lemljenja.

Trošak se odnosi na sve troškove povezane sa stiskom žica do terminala. Čimbenici su troškovi opreme, kao i dugoročni neizravni troškovi: npr. troškovi rezanja i pripreme žica, troškovi rada, održavanja, prerade i drugi materijalni troškovi.

Svaki je proizvodni proces jedinstven, tako da se primijenjeni troškovi drastično razlikuju ovisno o količini ili potrebi.

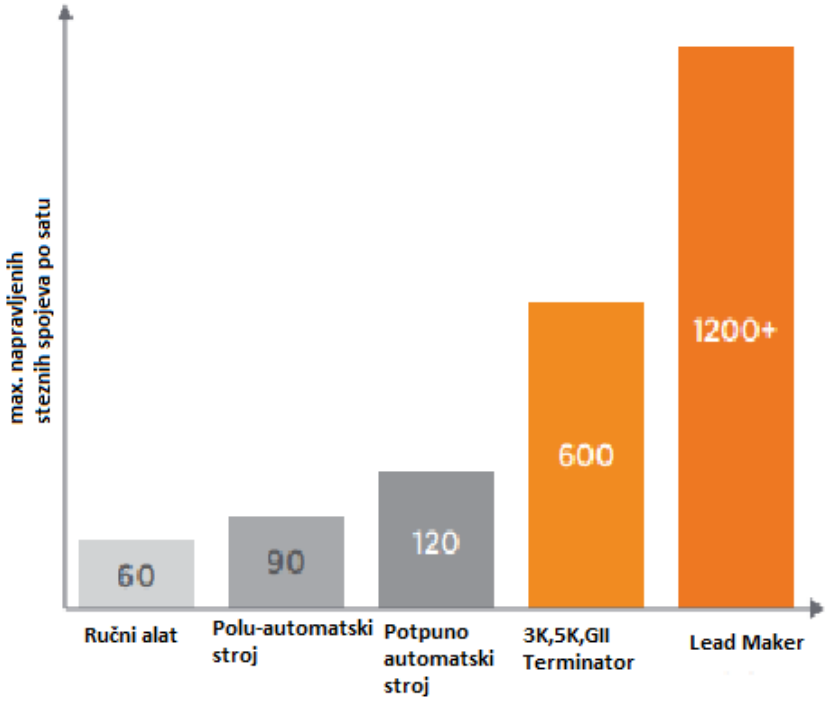
Stolni alat za stezno spajanje vodiča koristi se samo za prototipove, popravke ili izradu rezervnih dijelova.

Potpuno automatizirani strojevi su vrlo pouzdani i precizni. Neki su konstruirani da rade satima bez intervencije operatera i osiguravaju primjenu točnog iznosa sile i pomaka na terminale, slika 28.



Slika 28. Potpuno automatiziran stroj za stezno spajanje vodiča [29]

Slika 29. prikazuje graf koji pokazuje kada bi se trebalo preći na drugi alat na temelju broja stezno spojenih žica i terminala koje proizvedu u satu.



Slika 29. Maksimalna količina stezno spojenih terminala u jednom satu ovisno o alatu kojim se stezno spaja vodič [30]

Postupci održavanja aplikatora mogu se grupirati u nekoliko skupina: osnovno održavanje, detaljno održavanje i održavanje ponovne provjere.

Osnovno održavanje : pregled, čišćenje i podmazivanje. Cilj je osnovno čišćenje i uklanjanje otpadaka, vizualni pregled trošenja alata i osiguranje nesmetanog rada aplikatora osnovnim podmazivanjem i finim podešavanjem. Važno je čuvati osnovne zapise o održavanju koji pokazuju tko je i kada proveo održavanje. Uobičajeno trajanje ovih provjera je 3 do 10 minuta i preporuča se nakon svakih 7000 steznih spojeva vodiča, što je obični jednom dnevno ili jednom u radnoj smjeni.

Detaljno održavanje: demontaža, čišćenje, pregled, popravak, izmjena alata i podmazivanje. Cilj detaljnog rastavljanja je pregled svih komponenti i osiguravanja nesmetanog i ispravnog rada. To uključuje zamjenu alata za stezno spajanje (štance i nakovnja). Procjena kvalitete steznog spajanja vodiča i fino prilagođavanje provodi se na temelju realnih uzoraka dobivenih pomoću preše za stezno spajanje vodiča, pri čemu se vode detaljni zapisnici o kvaliteti, dimenzijama steznog spajanja vodiča itd. Obično vrijeme za dovršavanje ovog održavanja je 10 do 30 minuta. Preporučuje se nakon svakih 35 000 steznih spojeva vodiča, tj. približno jednom tjedno.

Redovno statističko održavanje. Uz sve postupke uključene u prethodno opisano detaljno održavanje, ovaj postupak uključuje cjelovitu statističku procjenu ponovne pojave određenog kvara. Opće varijable koje se moraju analizirati su: visina steznog spajanja vodiča, širina vodiča i sila povlačenja. Opća svojstva koja se moraju ocijeniti su vizualne karakteristike i analiza mikrostrukture presjeka. Na temelju tih podataka donosi se odluka o zamjeni istrošenog aplikatora. Zamjena aplikatora obično traje od 30 do 90 minuta, ovisno o količini kombinacija žica i terminala koje se koriste za određeni aplikator. Preporučuje se nakon svakih 1 500 000 steznih spojeva vodiča ili približno jednom godišnje.

Jednom kada se uspostave postupci i opći zahtjevi za održavanje, mora se i utvrditi učestalost kojom se oni izvode [31].

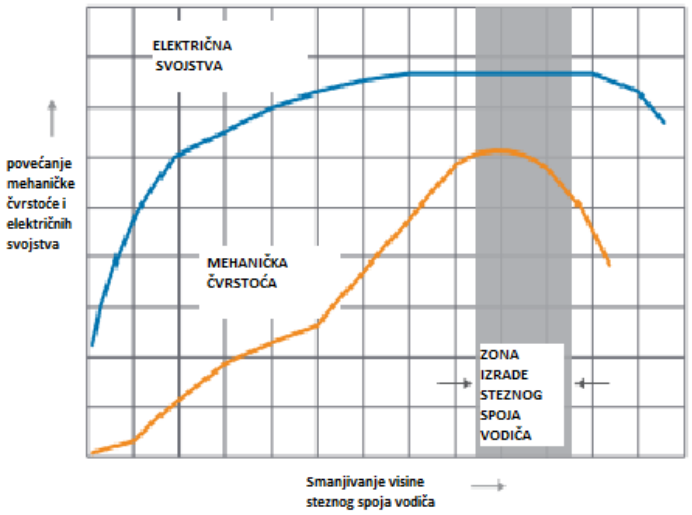
4.2. STEZNI SPOJ VODIČA

Alat, terminal i žica pažljivo su konstruirani da djeluju u tandemu, stvaranju steznih spojeva vodiča koji optimiziraju električna i mehanička svojstva. Inženjer konfigurira profil steznog spoja vodiča (visina steznog spajanja i širina steznog spajanja vodiča) kako bi se postigao

željeni oblik žice i terminalnih krila kada se formiraju u jedan homogeni metal. Previše labav stezni spoj vodiča rezultirat će lošim mehaničkim svojstvima i električnom vodljivosti. Previše zbijen stezni spoj može poboljšati električna svojstva do određene točke, ali može oštetiti tijelo terminala ili žice, što uzrokuje smanjenje u vlačnoj čvrstoći i / ili otpornosti na vibracije.

Slika 30. prikazuje kompromise prilikom konstruiranja steznim spajanjem. Zasjenjeno sivo područje je raspon konfiguracija profila steznih spojeva koji optimiziraju električna i mehanička svojstva. Konstruiranje steznog spoja vodiča je pažljiv proces koji zahtijeva dugogodišnje iskustvo.

Alati i terminali različitih proizvođača nisu konstruirani da rade u tandemu i zbog toga svojstva steznog spoja vodiča ne mogu biti zajamčena [30].



Slika 30. Graf mehanička i električna svojstva ovisna o visini steznog spoja vodiča [30]

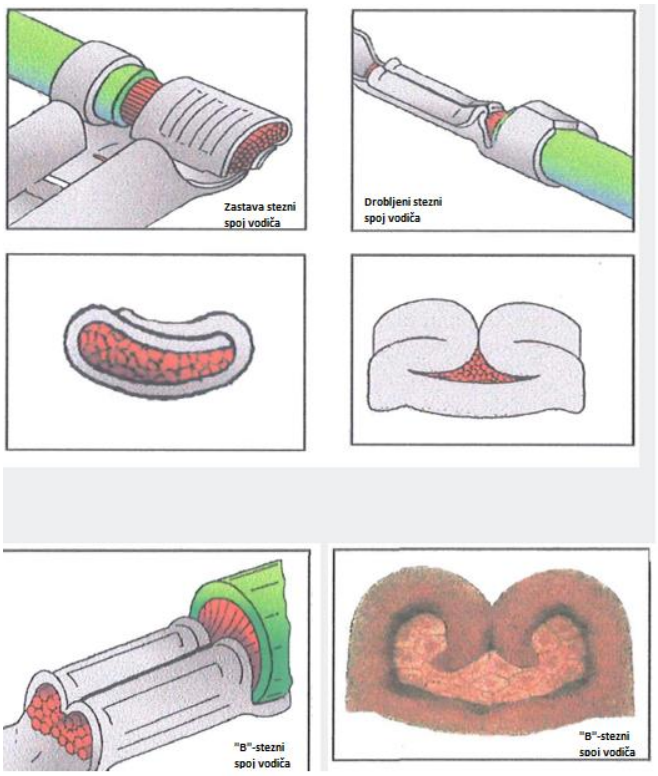
Krila steznog spoja vodiča mogu biti otvorena ili zatvorena.

Otvorena krila steznog spoja vodiča

Prije steznog spajanja vodiča oblik poprečnog presjeka u pravilu je u obliku slova U. Mogući su i drugi oblici. Konačni oblik presjeka steznog spoja vodiča nakon steznog spajanja otvorenih krila je u pravilu B-oblik. Ostali oblici također postoje na tržištu za posebne stezne spojeve vodiča. Stezni spoj vodiča tipa B je najčešći u automobilskoj industriji zbog robusnosti i ekonomičnosti, slika 31.

Zastavičasti stezni spoj vodiča (engl. *flag crimp*) obično se koristi na mjestima gdje je raspoloživi prostor konektora vrlo mali.

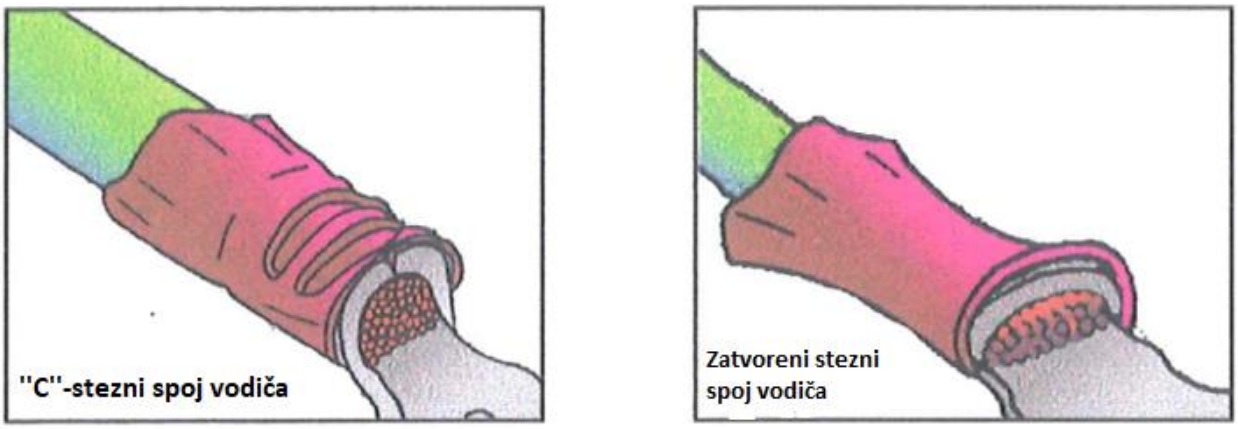
Drobljeni stezni spoj vodiča (engl. *crush crimp*) koristi se za vrlo male žice debljine oko 0,05 - 0,14 mm, zamjenjuje se limenim i dugim B steznim spojem vodiča.



Slika 31. Oblici steznog spoja vodiča s otvorenim krilima nakon steznog spajanja [18]

Zatvorena krila steznog spoja vodiča

Stezni spojevi vodiča sa zatvorenim krilima (stezaljkama) obično su dio terminala izrađenih od metala drugim proizvodnim postupcima (obrada vijaka, hladno valjanje, duboko izvlačenje, utiskivanje i oblikovanje), a zatim slijedi utiskivanje i oblikovanje (lemljenje ili zavarivanje šava), slika 32. Početni presjek takvog steznog spajanja je obično okrugao.



Slika 32. Oblici steznog spoja vodiča sa zatvorenim krilima nakon steznog spajanja vodiča [18]

Izolacijski stezni spoj vodiča također može biti različitih oblika, ovisno o zahtjevima izvedbe i potrebnom nagibu, slika 33.

Preklopni stezni spoj vodiča (engl. *overlapping crimp*) je izolacijski stezni spoj vodiča prikladan za vodiče s tankoslojnom izolacijom.

Isprepleteni stezni spoj vodiča (engl. *wrap – over crimp*) je izolacijski stezni spoj vodiča gdje se stezni spoj vodiča završava isprepletanjem i time potpuno zatvarajući spoj.

O-stezni spoj vodiča je koristan za obradu pojedinačnih uzoraka.



Slika 33. Oblici izolacijskog steznog spoja vodiča [18]

4.2.1. Dijelovi steznog spoja vodiča i izolacijskog vodiča

Dijelovi steznog spoja vodiča i izolacijskog vodiča su sljedeći, slike 34 i 35:

BRIJEG STEZNOG SPOJA VODIČA (engl. *crimp bell mouth*)

Nastaje na rubu steznog spoja vodiča. Djeluje kao lijevak za finožični vodič. Smanjuje mogućnost pojave oštrog ruba steznog spoja vodiča koji bi mogao presjeći žice. Kao opću smjernicu, debljina brijega steznog spoja vodiča mora biti približno 1 do 2 puta debljine terminalnog materijala.

TEST SAVIJANJA (engl. *test bend*)

Jedan od načina za ispitivanje steznog spoja vodiča i izolacije je savijanje žice nekoliko puta i zatim se procjenjuje stanje izolacije i žice. Kao opće pravilo, izolacija steznog spajanja treba podnijeti savijanje žica 60 do 90 stupnjeva u bilo kojem smjeru, nekoliko puta. Kada se radi s malim veličinama žice, potrebno je pažljivo postaviti uzorak tako da se žica na stražnjoj strani izoliranog steznog spoja ne siječe.

ČETKICA VODIČA (engl. *conductor brush*)

Četkica vodiča sastavljena je od finožičnog vodiča koje se protežu poslije stezno spojene žice na kontaktnoj strani terminala. To pomaže da se osigura mehanička kompresija cijelom dužinom steznog spajanja žice. Četkica vodiča ne smije se pružati u kontaktno područje terminala.

STEZNO SPOJENI VODIČ (engl. *conductor crimp*)

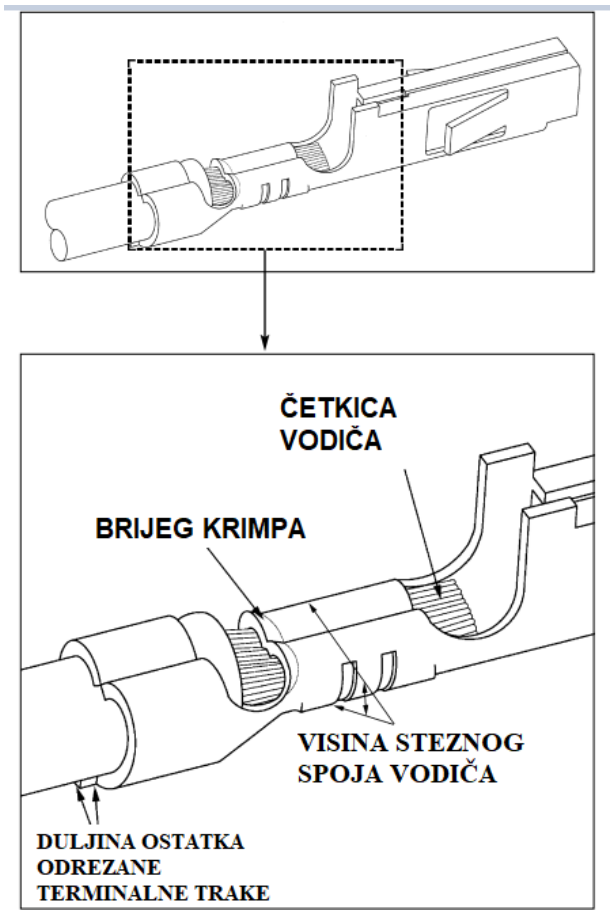
Ovo je kompresija terminala oko žice vodiča. Ova veza stvara zajedničku električnu stazu s malim otporom i velike mogućnosti provođenja struje.

VISINA STEZNO SPOJENOG VODIČA (engl. *conductor crimp height*)

Visina prešanja vodiča mjeri se od gornje površine oblikovane stiskanjem do dna najviše zakrivljene površine, pri čemu se ne uključuju točke istiskivanja u ovo mjerenje. Mjerenje visine steznog spajanja vodiča je brzo, a izvrstan je parametar za kontrolu kvalitete. Specifikacija visine steznog spajanja vodiča obično se postavlja kao ravnoteža između električnih i mehaničkih svojstva u cjelokupnom rasponu žica i zaštita, kao i terminalnih materijala i prevlaka.

DULJINA OSTATKA ODREZANE TERMINALNE TRAKE (engl. *cutt – off tab length*)

Ovo je materijal koji strši izvan izolacijske pregrade nakon što se terminal odvoji od nosive trake. Općenito je pravilo da je duljina ostatka približno 1,0 do 1,5 puta debljina terminalnog materijala. Produžetak koji je predug može izlagati terminal izvan kućišta oštećenju ili može dovesti do prekida električnog toka. U većini situacija postavlja se alat koji omogućava rezanje ostatka koji se uklapa u jednu debljinu materijala [32].



Slika 34. Dijelovi steznog spoja vodiča i izolacijskog steznog spoja vodiča, 1. dio [32]

POLJE SPOJA / NEUTRALNO POLJE / PRIJELAZNO POLJE KONTAKTA (engl. *extrusions*)

To su mali produžetci koji se formiraju na dnu stezno spojenog vodiča, koji nastaju zbog razmaka između alata za bušenje i nakovnja. Ako je nakovanj istrošen ili je terminal prekriven, to je rezultat pretjeranog istiskivanja. Neravnomjerno istiskivanje također može nastati ako

poravnanje probijanja i nakovnja nije ispravno, ako je podešavanje dovoda isključeno ili ako nema dovoljno ili je prekomjerno opterećenje terminala.

IZOLACIJSKI STEZNI SPOJ VODIČA (engl. *insulation crimp*)

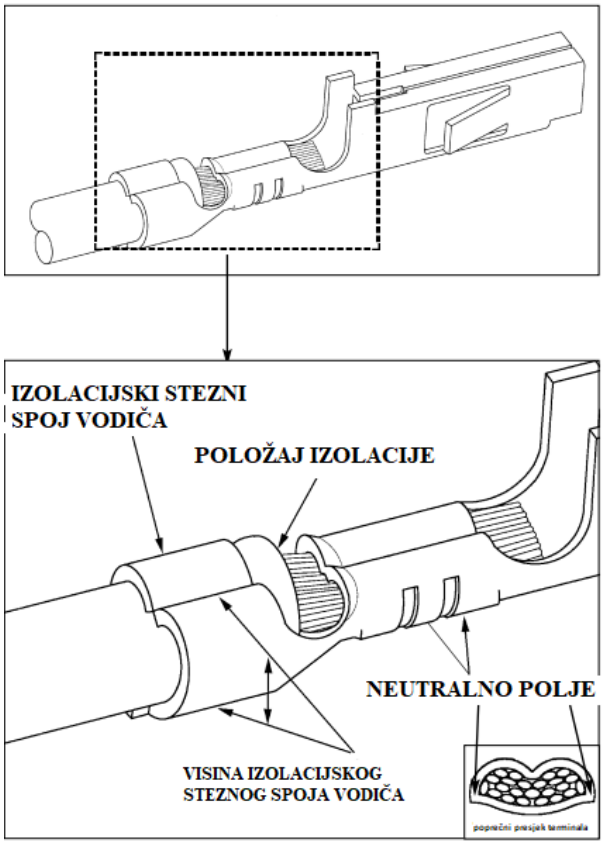
Ovo je dio terminala koji pruža objema žicama podršku za umetanje u kućište i omogućava terminalu da izdrži udarce i vibracije. Terminal treba držati žicu što je čvršće moguće bez rezanja kroz žice vodiča. Prihvatljivost izolacijskog steznog spajanja je subjektivna i ovisi o primjeni. Preporučuje se test savijanja kojim se utvrđuje je li reljef deformacije prihvatljiv za svaku pojedinu primjenu.

VISINA IZOLACIJSKOG STEZNOG SPOJA VODIČA (engl. *insulation crimp height*)

Većina terminala je konstruirana da se može koristiti za više različitih promjera žica. Unutar raspona terminala, promjer izolacije možda neće u potpunosti okružiti žicu. Taj će uvjet i dalje pružiti prihvatljivu izolaciju za stezno spajanje vodiča većine zahtjeva. Veća izolacija trebala bi čvrsto prianjati najmanje 88 % žice. Manja izolacija trebala bi čvrsto prianjati barem 50 % žice. Da bi se procijenio dio izolacije, presiječe se žica na kraju sa stražnjom stranom terminala. Nakon što se utvrdi optimalna postavka za primjenu, važno je dokumentirati visinu steznog spajanja vodiča i izolacije. Zatim, kao dio postupka postavljanja, operator može provjeriti visinu steznog spajanja.

POLOŽAJ IZOLACIJE (engl. *insulation position*)

To je mjesto izolacije u odnosu na prijelazno područje između steznog spoja vodiča i izolacije. Na prijelaznom području mora biti vidljiva izolacija. Položaj izolacije osigurava da se izolacija steže duž cijele duljine izolacijskog sloja steznog spoja i da nijedna izolacija ne bude ispod steznog spoja vodiča. Položaj izolacije postavlja se duljinom oguljenog kabela. Za primjenu za automatsku obradu žica položaj izolacije postavlja se podešavanjem pritiska za ulaz / izlaz [32].



Slika 35. Dijelovi steznog spoja vodiča i izolacijskog steznog spoja vodiča, 2. dio [32]

5. VIZUALNI PREGLED STEZNOG SPOJA VODIČA

Širina zone steznog spoja vodiča mjeri se pomičnim mjerilom. Pomična mjerilom se obično izrađuju od čelika, no moguće su i izvedbe od polimera, kao i od drveta za mjerenja predmeta većih dimenzija [33]. Visina zone steznog spoja vodiča mjeri se mikrometrom. Mikrometar je sprava za mjerenje vrlo malih duljina. Sastoji se od precizno izrađenog vijka maloga hoda, koji se okreće u cilindarskoj matici. Na matici su naznačeni dijelovi okretaja. Zakretanjem vijka dovodi se graničnik u dodir s predmetom koji se mjeri, a iz broja okretaja vijka određuje se mjerena duljina. Mikrometar je mjerni instrument kojem je točnost očitanja mjerne vrijednosti do 0,01 mm. Hod vijka (translacijski pomak za puni okret) iznosi točno 0,5 mm. Budući da je skala na bubnju podijeljena na 50 dijelova, moguće je mjeriti duljinu do točnosti očitanja od 0,01 mm, što je peterostruko točnije od mogućnosti koju pruža pomično mjerilo [34]. Mjerenje se provodi u središtu steznog spoja vodiča tako da na njega ne utječu vrijednosti brijega steznog spoja vodiča (engl. *crimp bell mouth*). Tanka oštrica mikrometra pridržava vrh steznog spoja vodiča dok šiljati presjek određuje donju najradijalniju površinu.

Test mjerenja visine

1. Završiti postupak postavljanja alata.

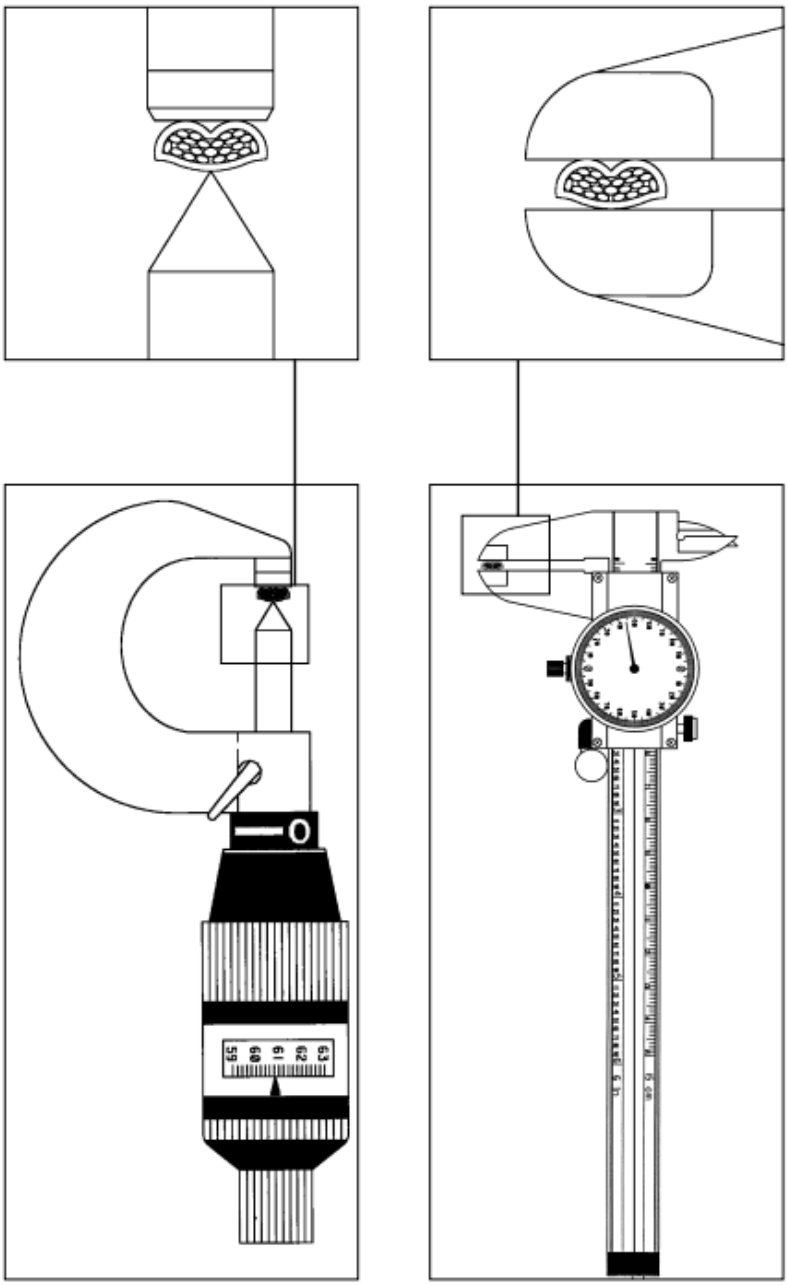
2. Uzeti najmanje 5 uzoraka.

3. Postaviti ravnu oštricu mikrometra preko središta dvostrukih polumjera steznog spoja vodiča. Ne uzimati mjerenje u blizini dijela gdje je brijeg steznog spoja vodiča.

4. Zakrenuti kotačić mikrometra dok vijak ne dodiruje najviše dno radijalne površine.

5. Zapisati očitanja visine steznog spoja vodiča. Minimalno 5 očitanja visina steznog spoja vodiča su potrebna za potvrdu svakog postavljanja. Za utvrđivanje sposobnosti najmanje je potrebno 25 očitanja.

6. Provjeriti visinu steznog spoja vodiča na svakih 250 do 500 uzoraka tijekom cijelog postupka steznog spajanja vodiča, ovisno o veličini serije [32].



Slika 36. Mjerenje visine i širine zone steznog spoja vodiča mikrometrom i pomičnim mjerilom [32]

Visina i širina steznog spoja vodiča, svi navedeni dijelovi steznog spoja vodiča i izolacijskog steznog spoja vodiča spadaju i u popis vizualnih pregleda (inspekciju). Dijelovi steznog spoja vodiča i izolacijskog vodiča ispituju se optičkim beskontaktnim mjernim mikroskopima i stereomikroskopima.



Slika 37. Optički mjerni mikroskop [35]

6. ELEKTRIČNI OTPOR

U sustavima niskog napona duljina vodiča može imati značajan utjecaj na pad napona. Čak i duljina kabla od nekoliko metara za male vodiče u poprečnom presjeku može proizvesti značajni pad napona, a ovaj se problem dobro pokazuje na nekim vozilima gdje svjetla vozila nisu toliko sjajna kao što bi mogla biti. Kada bi se provjerio napon na priključcima žarulje, vidjelo bi se da žarulje ne primaju punih 12 V jer je debljina vodiča premala za duljinu kabla. Neki se vlasnici vozila odluče poboljšati svoja prednja svjetala koristeći kabel s debljim vodičem i duljine koji omogućava da puni naponom žarulje, često uz vrlo značajna poboljšanja svjetline.

Važno je napomenuti da se pad napona događa ne samo uzduž pozitivnog kabla do opterećenja, već i uzduž negativnog povratnog kabla. Kad se unese duljina kabla kao jednosmjerna udaljenost do opterećenja, kalkulator pretpostavlja radi pojednostavljenja da je povratna udaljenost jednaka, što daje ukupnu duljinu kabla koja je dvostruko veća od unesene vrijednosti. U praksi je ponekad duljina povratnog kabla puno kraća jer ga je moguće uzemljiti do obližnje točke na šasiji vozila, tako da bi ostatak udaljenosti do negativnog pola akumulatora trebao imati nizak otpor u odnosu na kabel. U ovom slučaju stvarni pad napona bio bi manji od izračunatog.

Pad napona može biti uzrokovan i visokim temperaturama, iako u manjoj mjeri od duljine kabla, jer kako temperatura raste, otpor raste i obrnuto.

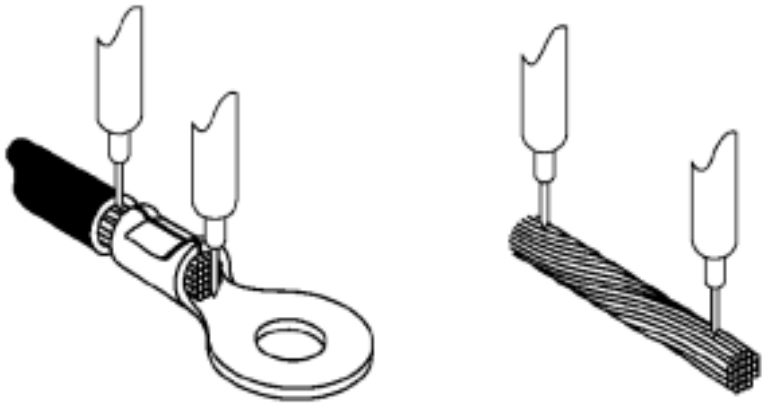
Mjerenje otpora stezno spojenog kabla mjeri se tako da se uspoređuje električni otpor na stezno spojenoj žici i otpor na normalnoj žici jednake duljine i izražava se relativnim otporom za određenu debljinu žice, slika 38 [36].

Relativni otpor steznog spajanja na žicu, $R_{rel.}$:

R_C- otpornost na steznom spoju vodiču

R_W- otpornost žice

$$R_{rel.} = \frac{R_c}{R_w} \quad (1)$$



Slika 38. Relativni otpor steznog spajanja na žicu [36]

Vrijednosti relativnog otpora manje od 1,0 označavaju stezni spoj s manjim otporom od žice. Vrijednosti veće od 1,0 pokazuju veći otpor nego žica.

Obično je lakše izmjeriti napon iznad stezno spojenog mjesta. Mnoge specifikacije navode zahtjeve u pogledu pada napona na zadanu struju. Pad napona je i uobičajeni naziv u industriji. Vrijednost otpora može se izračunati iz Ohmovog zakona (2):

$$R = \frac{U}{I}. \qquad (2)$$

R = otpor žice, Ω, om

U = napon, V, volt

I = struja, A, amper

Pad napona i vrijednosti otpora kod steznog spoja žice su prilično mali i izražavaju se u milivoltima ili miliomima. Pojava lošeg stisnutog steznog spoja žice može biti uzrokovana od nekoliko čimbenika. Prisutnost zračnih džepova ili praznina u steznom spoju će npr. izazvati veći otpor. Te iste praznine koje izazivaju veći otpor mogu prouzrokovati i porast temperature, što zauzvrat povećava brzinu korozije i dodatno povećava otpornost od kvara. Stezni spoj vodiča koji ima oštar prijelaz i vodič (žica) koji je izdužen iz oblika steznog spoja mogu dovesti do presijecanja kružnog područja vodiča i uzrokovati veći otpor u ovoj oslabljenoj točki [30].

Iz sljedeće jednadžbe može se izračunati otpornost žice (3) :

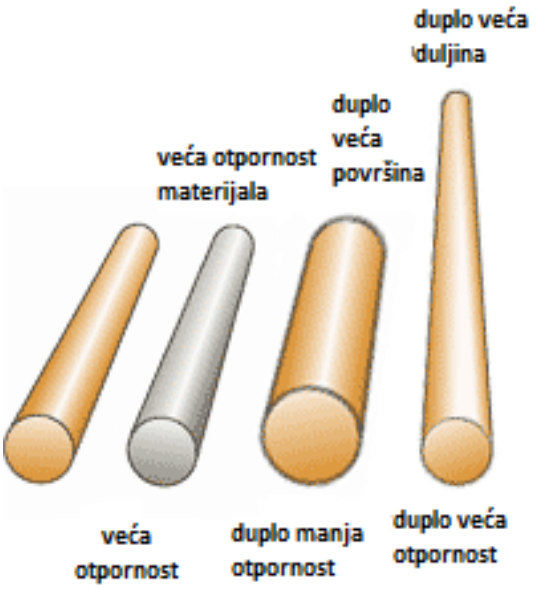
$$R = \frac{\rho l}{A}. \quad (3)$$

R = otpor, Ω, om

ρ = otpornost materijala, Ωm, om-metar

l = duljina žice, m, metar

A = presjek površine, m^2, metar kvadratni



Slika 39. Otpornost vodiča [37]

6.1. LEMLJENJE

Prije mjerenja otpora lemi se stražnji kraj žice kako bi finožični vodič postao čvršći i nesavitljiv da bi se otpor mogao lakše, bolje i točnije izmjeriti.

Izrada bilo kojeg elektroničkog uređaja uključuje i meko lemljenje. Prednost lemljenog spoja je u tome što on trajno osigurava dobru mehaničku pričvršćenost komponenti i električnu vezu. Osnovni sastojak lemljene žice je kositar. Tinol je zaštićena trgovačka oznaka, ali i sinonim za lemljenu žicu. Za najširu primjenu koristi se lemljena žica koja sadrži 60 % kositra i 40 % olova, promjera 0,7–1,0 mm. Temperatura taljenja ove žice za lemljenje je 188 ºC.

Nisko talište je prednost, jer se elektronički elementi prilikom lemljenja manje zagrijavaju. Kolut lemljene žice od 100 grama košta oko 45 kuna. Lemljenje uranjanjem prouzrokuje manje deformacije nego lemljenje plamenom uslijed zagrijavanja.

Bez obzira na to, lemljenje može zahtijevati relativno kompleksne alate te se stoga primjenjuje na relativno srednje do visokoj proizvodnosti. Proces je pogotovo pogodan za dijelove male do srednje veličine s mnogo skrivenih spojeva.

U elektronici, predmet lemljenja mora biti čist. Za lemljenje čistih spojena dovoljna je samo tinol žica s kolofonijem (kolofonskom smolom) u sredini. U rijetkim slučajevima, može se koristiti i kolofonij iz zasebne kutije.

Kolofonij se je nekada više primjenjivao. U današnje vrijeme, kao zasebni artikl za pospješivanje lemljenja rjeđe se koristi, jer se optimalna količina smolaste tvari na bazi kolofonija već nalazi u sredini tinola. Iz tog razloga, jedna kutijica može trajati godinama. Kolofonij može biti u krutom stanju ili kao gusta pasta [38].



Slika 40. Lemna žica u sredini sa smolastom tvari na bazi kolofonija [38]

7. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE

Ispitivanje vlačne čvrstoće je brzo testiranje i destruktivan način za procjenu mehaničkih svojstva steznog spoja vodiča koja karakteriziraju mehaničku otpornost i njihovu deformabilnost. Prilikom izrade steznog spoja vodiča, dovoljnim pritiskom mora se onemogućiti pojavu oksida koji se mogu nakupiti na finožičanom vodiču i kositrenoj prevlaci s unutarnje strane terminala. Ovo je neophodno za postizanje dobrog kontakta metal-metal. Ako se to ne dogodi, otpor se može povećati. Stezno spajanje stezno spojenog vodiča smanjit će kružni prostor vodiča i povećati otpor.

Test vlačne čvrstoće također je dobar pokazatelj problema u procesu proizvodnje. Izrezane ili nazubljene žice u operaciji skidanja žica, nedostatak brijega stezno spojenog vodiča (engl. *bellmouth*) ili četkice vodiča te nepravilna visina steznog spoja vodiča ili alata smanjit će rasteznu silu, odnosno vlačnu čvrstoću. Svojstva žice, finožičnog vodiča i konstrukcija terminala (debljina materijala i mjesta spajanja), također može povećati ili smanjiti razinu sile razvlačenja.

Većina ispitivanja vlačne čvrstoće provode se na kidalici koja steže žicu i razvlači određenom brzinom i mjeri silu. Stezno spojeni vodič i terminal montirani su na kidalici te osigurani tako što su stezaljkom pričvršćeni na kidalici. Sustav primjenjuje linearno povlačenje na testnom uzorku s konstantnom primijenjenom silom sve dok žica ne pukne u području steznog spoja vodiča. Žica se ne smije izvlačiti, a lom ili odvajanje od steznog spoja prije vlačne čvrstoće je uvjet za valjanost ispitivanja [30].

Tijek ispitivanja vlačne čvrstoće steznog spoja vodiča:

1. Odrezati duljinu žice otprilike 152 mm.

2. Odrezati jedan kraj na 13 mm ili dovoljno dug da nema žičane izolacije ispod izolacijskog držača ili otpustiti stezno spojenu izolaciju pa nema prianjanja na izolaciju žice.

3. Stezno spajati odgovarajući terminal na žici do nazivne stezno spojene visine.

4. Vizualno pregledavanje da li ima brijega na steznom spoju vodiča, četkicama vodiča i finožičnom vodiču.

5. Postaviti brzinu razvlačenja na 50 mm/min.

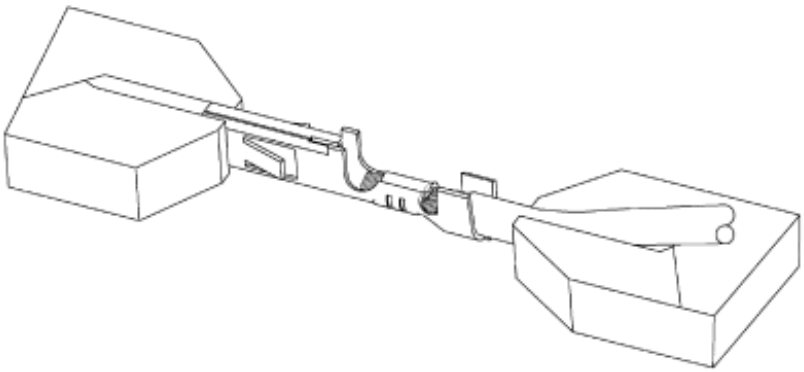
6. Bez obzira na vrstu kidalice, i žica i terminal moraju biti sigurno stegnuti u čeljusti kidalice.

7. Započeti ispitivanje vlačne čvrstoće.

8. Zabilježiti očitanja vlačne sile. Najmanje pet mjerenja sile trebalo bi učiniti kako bi potvrdili svaku postavku. Najmanje 25 očitanja treba uzeti za sposobnost.

9. Usporediti najniže očitanje s podacima o minimalnoj vlačnoj sili.

Kod primjene duplih steznih spojeva žica za stezno spajanje ne smatra se boljom opcijom od manje žice jednom stezno spajanje. Veća očitanja sile povlačenja mogu se vidjeti ako su se obje žice uhvatile i povukle točno zajedno. Povlačenje svake žice pojedinačno rezultirat će znatno nižim očitavanjem sile. Ako su obje žice od veličine, gornji dio žica obično rezultira nižim očitavanjem od donjeg dijela žice zbog učinka terminalnih spajanja [32].



Slika 41. Ispitivanje vlačne čvrstoće [32]

Jednadžba vlačne čvrstoće (4) :

$$R_{\mathrm{m}} = \frac{F_{\mathrm{m}}}{S_0} \tag{4}$$

R_{m} – vlačna ili rastezna čvrstoća, N/mm^2

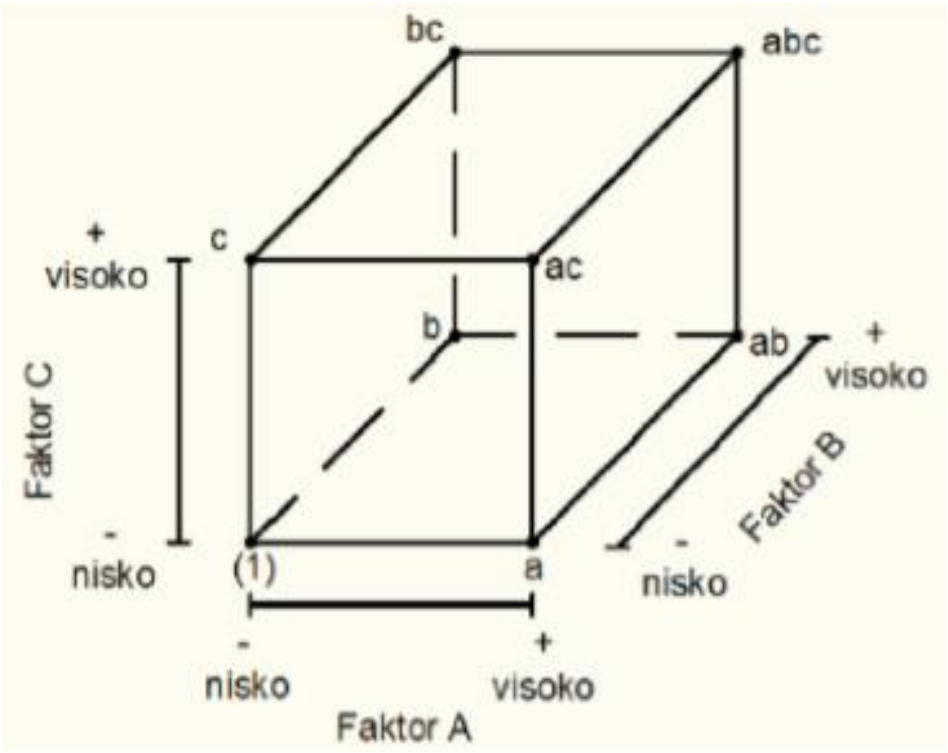
F_{m} – maksimalno postignuta sila, N

S_0 – površina poprečnog presjeka vodiča, mm^2

8. PLANIRANJE POKUSA

Upotreba statističkih metoda planiranja pokusa može povećati efikasnost samog procesa eksperimentiranja i dati bolje i pouzdanije zaključke. Planiranje pokusa se odnosi na procedure planiranja istraživanja koja se temelje na statističkom ocjenjivanju rezultata ispitivanja kako bi se s određenom razinom povjerenja donosili zaključci o značajkama procesa ili proizvoda. Primjenom procedura planiranja pokusa može se uštediti puno ljudskih, vremenskih i financijskih resursa.

Faktorsko planiranje pokusa proučava kako se uz najmanji broj provedenih pokusa generira maksimalna količina informacija o tome kako ulazne varijable utječu na izlazne podatke procesa. Broj izvedenih pokusa ovisi o broju faktora. Slika 42. prikazuje planiranje pokusa na dvije razine tri faktora (2^3).



Slika 42. Grafički prikaz potpunog plana pokusa 2^3 [39]

U matričnoj kodiranoj formi ovakav plan s izlaznim vrijednostima možemo prikazati na način kao što je prikazano u tablici 1.

Tablica 1. Matrica kodiranih vrijednosti glavnih utjecaja i međudjelovanja za 2^3

GLAVNI UTJECAJI							Izlazni podaci	
A	B	AB	C	AC	BC	ABC	Y	
-	-	+	-	+	+	-	y1	1
+	-	-	-	-	+	+	y2	a
-	+	-	-	+	-	+	y3	b
+	+	+	-	-	-	-	y4	c
-	-	+	+	-	-	+	y5	ab
+	-	-	+	+	-	-	y6	ac
-	+	-	+	-	+	-	y7	bc
+	+	+	+	+	+	+	y8	abc

Budući da postoje tri glavna utjecaja (A, B, C), tri međudjelovanja dvaju faktora (AB, AC, BC) i međudjelovanje triju faktora (ABC), regresijski model za ovaj slučaj glasi:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \varepsilon \quad (5)$$

pri čemu regresijski koeficijent dobivamo kao srednju vrijednost svih izlaza *y*, a ostale regresijske koeficijente dobivamo kao polovice vrijednosti odgovarajućih glavnih utjecaja odnosno međudjelovanja [39].

8.1. METODA ODZIVNE POVRŠINE

Metoda odzivne površine (engl. *Response Surface Methodology*, RSM) je skup matematičkih statističkih tehnika koje nalaze primjenu u modeliranju i analizi procesa u kojima se prati odziv koji ovisi o nekoliko varijabli, a cilj je optimizacija odziva. Odziv je mjerljiva veličina kvalitete proizvoda ili procesa.

Kada se jednom ustanovi zakonitost ili odnos nezavisnih varijabli preko matematičkog oblika, odzivne funkcije, takav oblik opisa pojave može poslužiti za donošenje konkretnih zaključaka o prirodi pojave.

Kao uvjet za metodu odzivne površine trebaju postojati barem dvije nezavisne varijable (x_1 i x_2) i jedna nezavisna varijabla (y). Rezultate procesa (zavisne varijable) moguće je opisati preko jednadžbe:

$$y = f(x_1 \cdot x_2) + \varepsilon \quad (6)$$

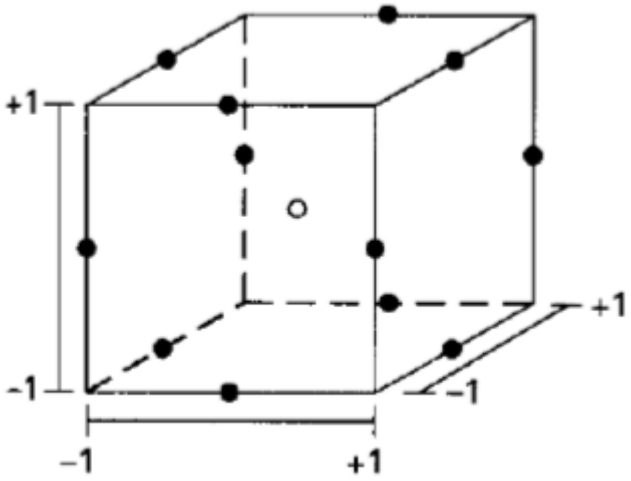
ε je pogreška ili šum koji se javlja u odzivu y. Očekivana vrijednost E može i prikazati sljedećom jednadžbom:

$$E(y) = f(x_1 \cdot x_2) \quad (7)$$

To je oblik odzivne površine.

Box-Behnkenov plan pokusa spada u skupinu nezavisnih kvadratnih planova pokusa. Koristi se kada se ispituju 3 razine svakog faktora, do 4 faktora. Nije baziran na punom ili djelomičnom faktorskom planu pokusa, odnosno ne sadrži točke na vrhovima pokusa nego se temelji na otkrivanju glavnih stanja – na polovicama stranica eksperimentalnog prostora, uz centralnu točku. Raspodjela procjene varijance mu je ujednačena u svim točkama. Smanjen je broj stanja pokusa, što štedi vrijeme i novac.

Slika 43. prikazuje Box-Behnkenov plan pokusa gdje su razine parametara jednake vrijednostima -1, 0 i 1. Crne točke označavaju ispitane vrijednosti na stranicama, te bijela točka centralnu točku.



Slika 43. Box-Behnkenov plan pokusa [40]

Glavna statistička metoda za testiranje međuovisnosti procesnih parametara jest analiza varijance (ANOVA). Ova metoda se najčešće koristi pri analizi nezavisnih parametara između kojih se razlike ne mogu iskazati kvantitativno. Kod nezavisnih parametara čija se vrijednost izražava kvantitativno, potrebno je promatranje cijelog raspona vrijednosti koje parametar može poprimiti, te onih vrijednosti koje nisu bile predviđene planom eksperimenta. Primjena analize varijance moguća je ako je mjerena varijabla normalno distribuirana i ako su varijance svih promatranih uzoraka jednake.

Koeficijent determinacije označava se s R^2, a njime se utvrđuje koliko je promjene zavisne varijable objašnjeno promjenom nezavisne varijable. Što je koeficijent determinacije bliži jedan, promatrani model je reprezentativniji.

Nakon što se provede statistička obrada dobivenih vrijednosti pokusa očekuje se dobivanje matematičkih modela oblika prikazanog izrazom :

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^{k} b_j x_j + \sum_{i<1}^{k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^{k} b_{jj} x^2{}_j \qquad (8)$$

gdje je:

b_0 - slobodni član

$\sum_{j=1}^{k} b_j x_j$ – glavni efekti

$\sum_{i<1}^{k} b_{ij} x_i x_j$ – interakcije prvog reda

$\sum_{j=1}^{k} b_{jj} x^2{}_j$ – kvadratni članovi matematičkog modela

Regresija definira oblik povezanosti dviju ili više varijabli. Model višestruke regresije se s obzirom na parametre dijeli na linearne i nelinearne modele. Linearni modeli su najjednostavniji i najčešće korišteni, pogotovo zato što je moguće velik broj nelinearnih modela svesti na linearan model primjenom transformacija. Najčešće primjenjivan linearni model je polinomna jednadžba, pogotovo kvadratni polinom.

Regresijska analiza se provodi s kodiranim faktorima i koeficijenti se izračunavaju prema tom kodiranju. Matematički model sa stvarnim faktorima se prevodi iz kodiranih faktora prema izrazu [40]:

$$X_{kod} = \frac{x_{stv} - \bar{x}}{(x_- - x_+)/2} \tag{9}$$

gdje je:
x_{stv} – stvarni faktor
$\bar{x}$ – prosječna vrijednost stvarnog faktora
x_+ - gornja vrijednost stvarnog faktora
x_- - donja vrijednost stvarnog faktora

9. EKSPERIMENTALNI DIO

9.1. CILJ RADA

Cilj rada je odrediti koji je najpovoljniji materijal prevlake, debljina vodiča i visina zone steznog spoja vodiča i terminala za postizanje najboljih mehaničkih, električnih i eksploatacijskih svojstava, uz što manje troškove. Ispitivanje se sastoji od dva dijela. Prvi dio ispitivanja proveden je metodom odzivne površine, a dobiveni rezultati statistički obrađeni. Drugi dio ispitivanja bio je na izrađenim uzorcima. Uzorci su bili podvrgnuti vizualnom kontrolom, analizom spoja svjetlosnim mikroskopom, mjerenje otpora prije i poslije toplinskog umora, te mjerenje vlačne čvrstoće. Potrebno je usporediti rezultate prvog i drugog dijela ispitivanja te donijeti zaključak.

9.2. PRIMJENA METODE ODZIVNE POVRŠINE

Na temelju Box-Behnkenovog plana pokusa za metodu odzivne površine, pomoću programskog paketa DX7 Software Design Expert (korištena je probna licenca), potrebno je utvrditi utjecaj pojedinih nezavisnih varijabli na zavisne varijable. Prikladnost modela određivana je pomoću *F*-testa te na temelju maksimalne vrijednosti koeficijenta determinacije, R^2 (engl. *Adjusted R-Squared* i *Predicted R-Squared*). Značajnost modela i članova odzivnog polinoma određivana je analizom varijance (ANOVA). Plan pokusa je prikazan u tablici 2. Potrebno je ispitati 17 točaka (jedna točka se ponavlja 5 puta – centralna točka) za konstrukciju odzivne površine umjesto maksimalnog broja pokusa koji bi bio 27, jer postoje 3 faktora koja se mjere na 3 razine, što se naziva 3^3 faktorskim planom pokusa.

3 debljine žice su: 0,5 mm², 0,75 mm², 1,00 mm².

3 visine steznog spajanja vodiča su: 1,35 mm, 1,39 mm, 1,43 mm.

3 cijene su: 0,2 USD (terminal s prevlakom od kositra), 0,4 USD (terminal s prevlakom od srebra), 0,6 USD (terminal s prevlakom od zlata)

Tablica 2. Plan pokusa generiran programom Design Expert

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Odziv 1	Odziv 2
	Debljina žice	Visina steznog spajanja vodiča	Cijena	Otpor	Vlačna čvrstoća
	mm²	mm	USD	mΩ	N/mm²
1	0,75	1,43	0,6	0,70	213
2	0,50	1,35	0,4	0,77	208
3	0,75	1,35	0,6	0,64	193
4	1	1,39	0,6	0,66	156
5	0,75	1,43	0,2	0,12	231
6	0,75	1,35	0,2	0,10	220
7	0,50	1,39	0,2	0,24	226
8	0,50	1,43	0,4	1,55	220
9	0,75	1,39	0,4	0,64	211
10	0,75	1,39	0,4	0,64	211
11	1	1,39	0,2	0,07	193
12	0,75	1,39	0,4	0,64	211
13	1	1,43	0,4	0,69	178
14	0,50	1,39	0,6	0,88	216
15	1	1,35	0,4	0,63	151
16	0,75	1,39	0,4	0,64	211
17	0,75	1,39	0,4	0,64	211

Redukcija modela se provodi eliminacijom unatrag, tj. isključivanjem neznačajnih članova čija je *p*-vrijednost veća od 0,05. Svi članovi čija je *p*-vrijednost manja od 0,05 sačinjavaju model. Ne treba uvijek odbaciti članove čije su *p*-vrijednosti malo veće od 0,05 jer to može biti rezultat odstupanja u mjerenju ili sl. Ovakvim pristupom redukciji modela eliminacijom unatrag, svi članovi imaju mogućnost uključivanja te je dobiveni model znatno robusniji od pristupa

uključivanjem unaprijed. U tablici 3. prikazani su rezultati obrade u programskom paketu DX7 Software Desing Expert (korištena je probna licenca) modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 3. Rezultati analize varijance za otpor

Izvor	Suma kvadrata	SS	Srednje kvadratno	*F* - vrijednost	*p* - vrijednost	
Model	1,81	9	0,2014	11,73	0,0019	Značajan
A-Debljina žice	0,2415	1	0,2415	14,06	0,0072	
B-Visina spoja	0,1058	1	0,1058	6,16	0,0421	
C-Cijena	0,6903	1	0,6903	40,19	0,0004	
AB	0,1296	1	0,1296	7,55	0,0286	
AC	0,0006	1	0,0006	0,0364	0,8541	
BC	0,0004	1	0,0004	0,0233	0,8830	
A^2	0,1235	1	0,1235	7,19	0,0315	
B^2	0,0411	1	0,0411	2,39	0,1660	
C^2	0,5121	1	0,5121	29,82	0,0009	
Ostatak	0,1202	7	0,0172			
Nedostatak	0,1202	3	0,0401			
Čista pogreška	0,0000	4	0,0000			
Ukupno	1,93	16				

Zbir kvadrata je Tip III - djelomičan

Model: *F*-vrijednost od 11,73 znači da je model značajan. Samo je 0,19 % vjerojatnosti da se ova velika *F*-vrijednost može dogoditi zbog šuma.

P-vrijednosti manje od 0,05 govore da su izrazi modela značajni. U ovom su slučaju A, B, C, AB, A^2, C^2 značajni faktori modela. Vrijednosti veće od 0,1 govore da izrazi modela nisu značajni. Ako postoji mnogo beznačajnih izraza modela, smanjenje razine modela može

poboljšati uspješnost modela. U tablici 4. prikazani su osnovni statistički podaci o dobivenom modelu koji opisuje kvalitetu izrađenog modela.

Tablica 4. Pregled statističkih podataka za otpor

Std. dev., mΩ	0,1311	R^2	0,9378
Srednja vrijednost, mΩ	0,6029	Podešeni R^2	0,8578
C.V.%	21,74	Predviđeni R^2	0,0047
		Točnost	13,8041

Predviđeni R^2 od 0,0047 nije toliko blizu podešenog R^2 od 0,8578 kao što se obično može očekivati, tj. razlika je veća od 0,2. To može značiti veliki blok efekt ili mogući problem s vašim modelom i / ili podacima. Ono što treba uzeti u obzir su smanjenje modela, transformacija odgovora, odljev itd. Svi empirijski modeli trebaju biti testirani.

Dobiveni matematički model s kodnim vrijednostima izgleda:

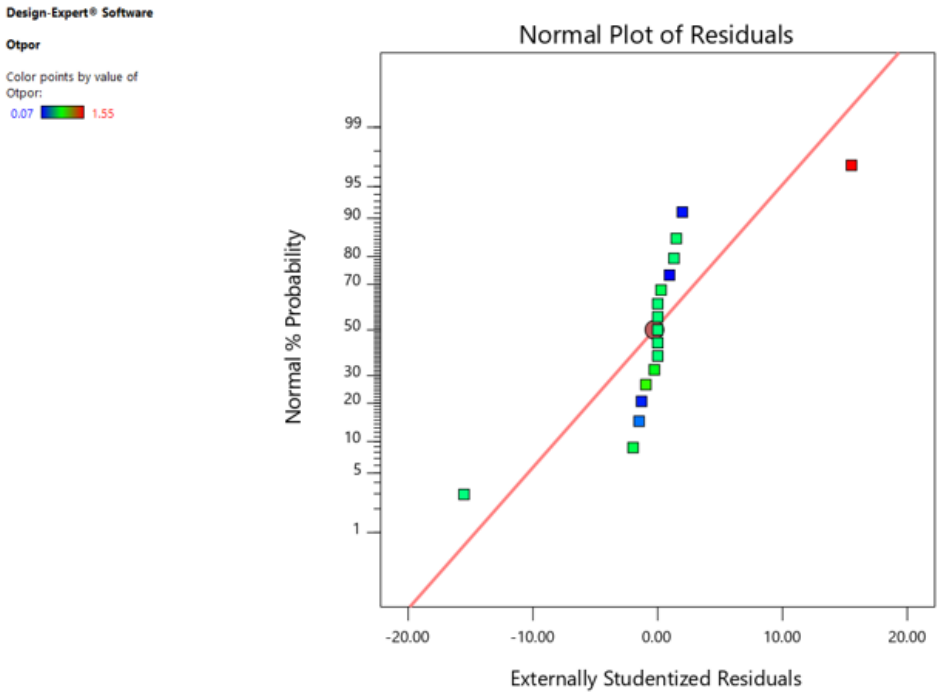
$$\text{Otpor} = + 0{,}6400 - 0{,}1737\,A + 0{,}1150\,B + 0{,}2938\,C - 0{,}18\,A\,B - 0{,}0125\,AC + 0{,}01\,B\,C + 0{,}17173\,A^2 + 0{,}0988\,B^2 - 0{,}3488\,C^2 \quad (10)$$

Jednadžba u smislu kodiranih faktora može se koristiti za predviđanje odgovora za određene razine svakog faktora. Prema zadanim postavkama, visoke razine faktora su kodirane s +1, a niske kao -1. Kodirana jednadžba je korisna za identificiranje relativnog utjecaja faktora usporedbom koeficijenata faktora.

Matematički model sa stvarnim vrijednostima izgleda:

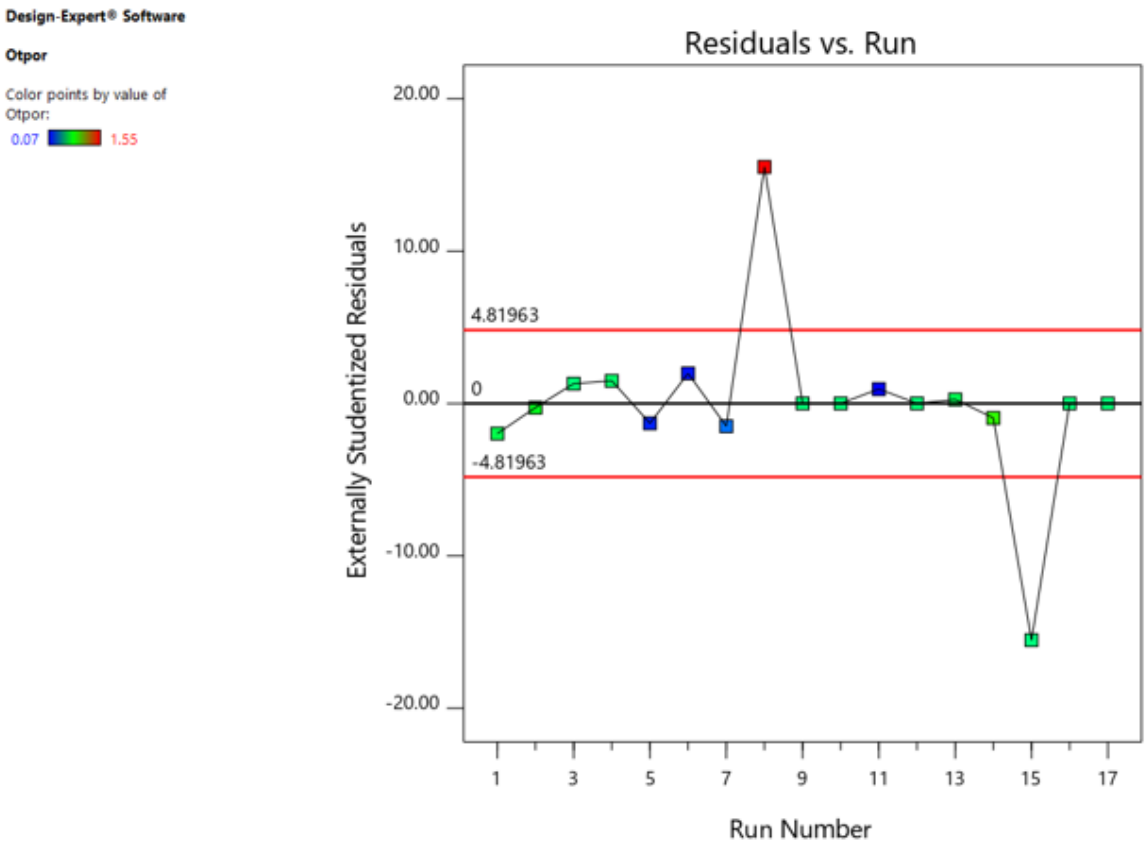
$$\text{Otpor} = + 97{,}826 + 20{,}315 \cdot \text{Debljina žice} - 155{,}7 \cdot \text{Visina steznog spoja vodiča} + 6{,}89375 \cdot \text{Cijena} - 18 \cdot \text{Debljina žice} \cdot \text{Visina steznog spoja vodiča} - 0{,}25 \cdot \text{Debljina žice} \cdot \text{Cijena} + 1{,}25 \cdot \text{Visina steznog spoja vodiča} \cdot \text{Cijena} + 2{,}74 \cdot \text{Debljina žice}^2 + 61{,}72 \cdot \text{Visina steznog spoja}^2 - 8{,}71875 \cdot \text{Cijena}^2 \quad (11)$$

Jednadžba s obzirom na stvarne faktore može se koristiti za predviđanje odgovora za određene razine svakog faktora. Ovdje bi za svaki faktor trebale biti navedene razine u izvornim jedinicama. Ovu jednadžbu ne treba koristiti za određivanje relativnog utjecaja svakog faktora, jer se koeficijenti skaliraju kako bi se prilagodile jedinice svakog faktora, a presretanje nije u središtu projektnog prostora. Slika 44. prikazuje normalizirani papir vjerojatnosti ostatka za pojedino stanje pokusa. Rezultati otpora otprilike prate krivulju predviđenog odziva.



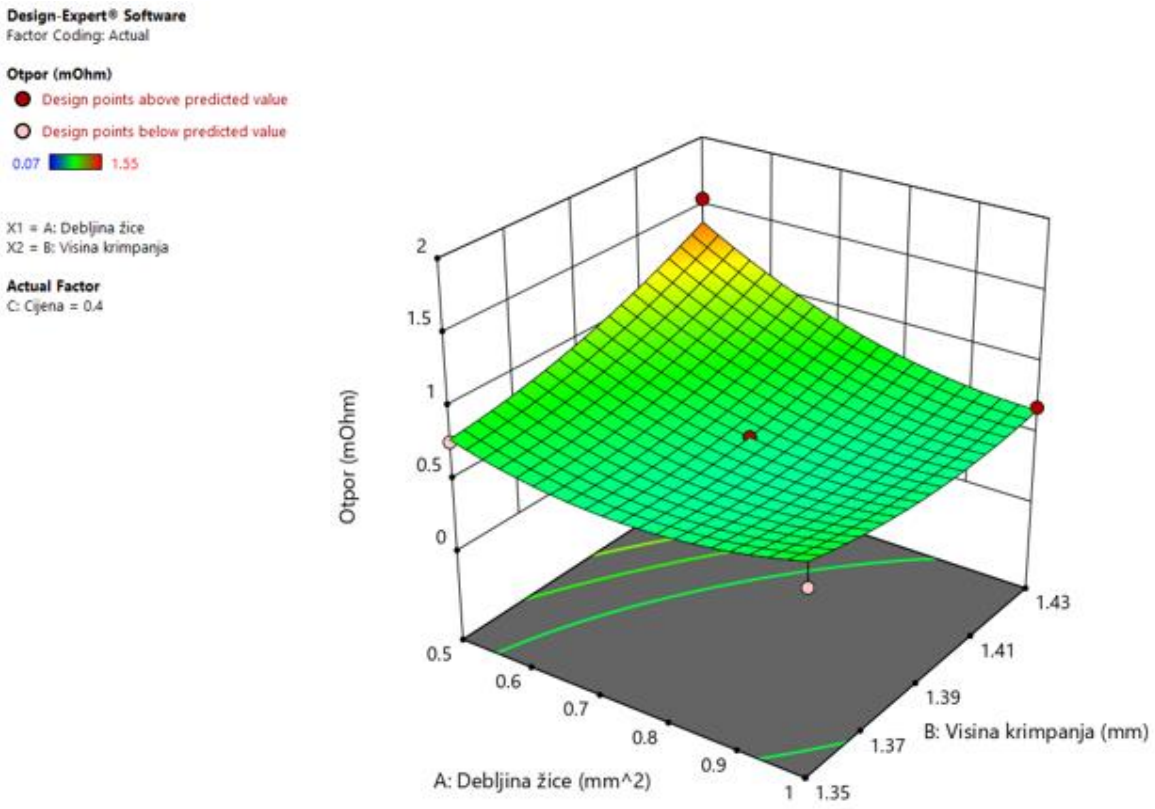
Slika 44. Normalizirani papir vjerojatnosti za električni otpor steznog spoja

Dijagram ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa provjerava postojanje sistematske pogreške koja je mogla utjecati na odziv tijekom provođenja eksperimenta. Slika 45. prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa. Vidljivo je da postoje dvije pogreške u pozadini.



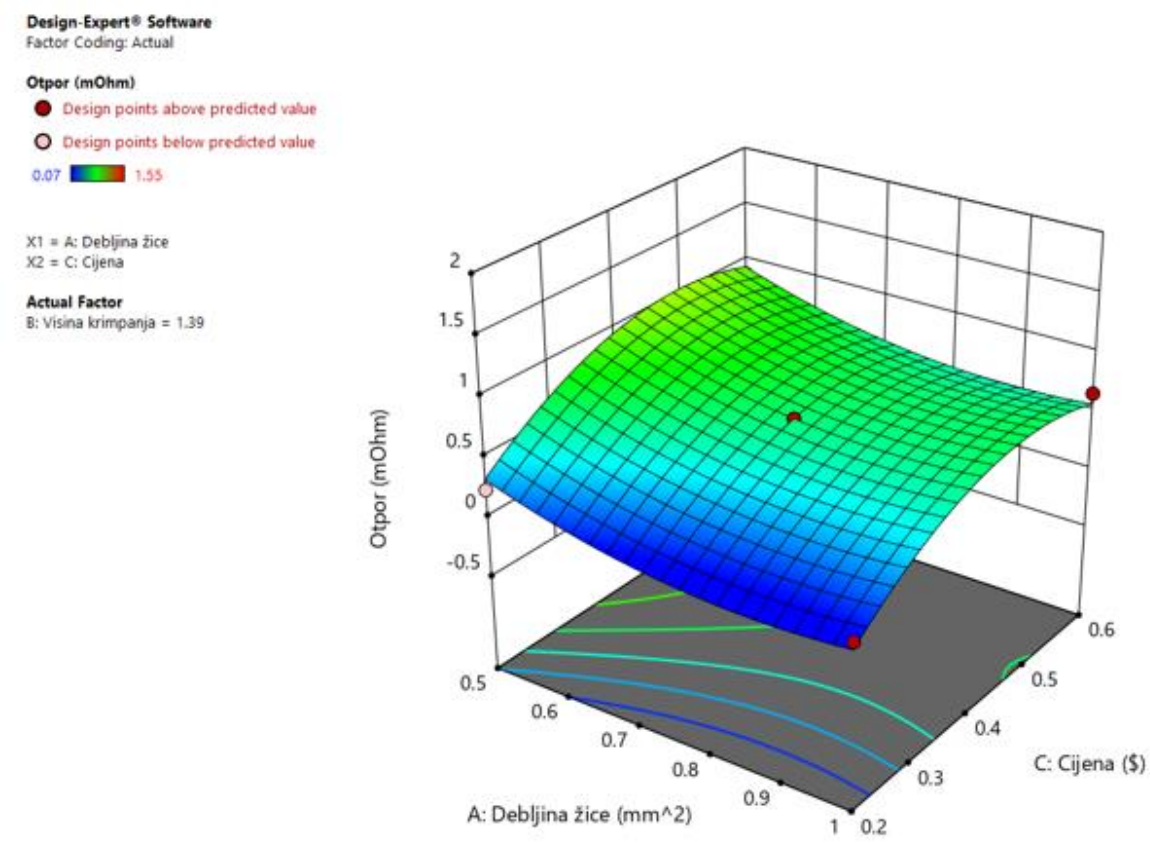
Slika 45. Slučajno rasipanje ostatka za električni otpor steznog spoja

Slike 46.,47.,48. prikazuju 3D prikaz odzivnih površina navedenog matematičkog modela. 3D graf sa slike 46. prikazuje da je otpor najmanji u točki gdje je debljina žice najveća, a visina steznog spoja žice najmanja. Povećanjem visine steznog spajanja žice i smanjenjem debljine žice dobije se veći otpor. Cilj je imati što manji otpor pa je najbolje imati što veću debljinu žice i što manju visinu steznog spoja žice.



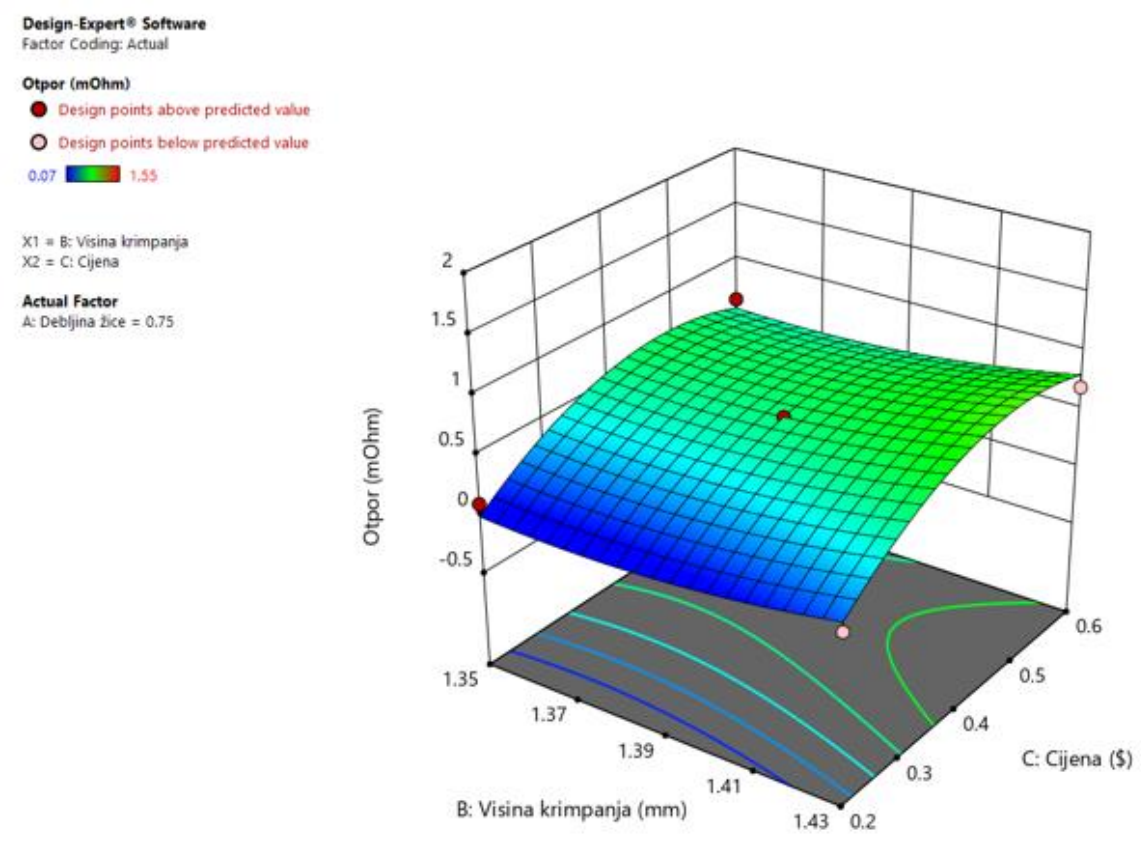
Slika 46. Prikaz odzivne površine otpora pri promjeni visine spoja i debljine žice

3D graf sa slike 47. prikazuje ponašanje otpora u ovisnosti o debljini žice i cijene. Povećanjem cijene raste i otpor. Kod najniže cijene otpor je otprilike isti na svim debljinama žice. Cilj je imati što manji otpor pa je najbolja opcija da se uzme najniža cijena.



Slika 47. Prikaz odzivne površine otpora pri promjeni cijene i debljine žice

3D graf sa slike 48. prikazuje kako se otpor ponaša u odnosu između visine steznog spajanja žice i cijene. Otpor je najveći kada je najviša visina steznog spajanja žice i najveća cijena. Otpor je najniži kad je najniža cijena. Kod najniže cijene visina steznog spajanja žice nema toliko utjecaja jer je otpor na svim visinama steznog spajanja žice otprilike isti.



Slika 48. Prikaz odzivne površine otpora pri promjeni visine spoja i cijene

Cilj je dobiti proizvod sa što manjim otporom. Rezultati koji su se dobili metodom odzivne površine nam govore da debljina žice mora biti što veća, a visina steznog spajanja žice i cijena moraju biti što manji ako želimo dobiti manji otpor.

U tablici 5. prikazani su rezultati obrade u programskom paketu DX7 Software Desing Expert (korištena je probna licenca) modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5. Rezultati analize varijance za vlačnu čvrstoću

Izvor	Suma kvadrata	SS	Srednja vrijednost	*F*-vrijednost	*p*-vrijednost	
Model	8225,24	9	913,92	492,11	<0,0001	značajan
A-Debljina žice	4608,00	1	4608,00	2481,23	<0,0001	
B-Visina spoja	612,50	1	612,50	329,81	<0,0001	
C-Cijena	1058,00	1	1058,00	569,69	<0,0001	
AB	56,25	1	56,25	30,29	0,0009	
AC	182,25	1	182,25	98,13	<0,0001	
BC	20,25	1	20,25	10,90	0,0131	
A^2	1540,07	1	1540,07	829,27	<0,0001	
B^2	29,01	1	29,01	15,62	0,0055	
C^2	145,33	1	145,33	78,25	<0,0001	
Razlika	13,00	7	1,86			
Nedostatak	13,00	3	4,33			
Čista pogreška	0,0000	4	0,0000			
Ukupno	8238,24	16				

Zbir kvadrata je Tip III - djelomičan

Model: *F*-vrijednost od 492,11 znači da je model značajan. Samo je 0,10 % vjerojatnosti da se ova velika *F*-vrijednost može dogoditi zbog šuma.

P-vrijednosti manje od 0,0500 govore da su izrazi modela značajni. U ovom su slučaju A, B, C, AB, AC, BC, A^2, B^2, C^2 značajni pojmovi modela. Vrijednosti veće od 0,1 govore da izrazi modela nisu značajni. Ako postoji mnogo beznačajnih izraza, smanjenje modela može poboljšati model.

Tablica 6. Pregled statističkih podataka za vlačnu čvrstoću

(Std. dev.) σ, N/mm^2	1,36	R^2	0,9984
Srednja vrijednost, N/mm^2	203,53	Podešeni R^2	0,9964
Koeficijent varijacije C.V.%	0,6696	Predviđeni R^2	0,9748
		Točnost	76,0622

Predviđeni R^2 od 0,9748 u razumnom je suglasju s podešenim R^2 od 0,9964; tj. razlika je manja od 0,2.

Dobiveni matematički izraz s kodnim faktorima izgleda:

Vlačna čvrstoća = + 211,00 - 24,00 A + 8,75 B - 11,50 C + 3,75 A B - 6,75 A C + 2,25 B C - 19,13 A² - 2,63 B² + 5,88 C² (11)

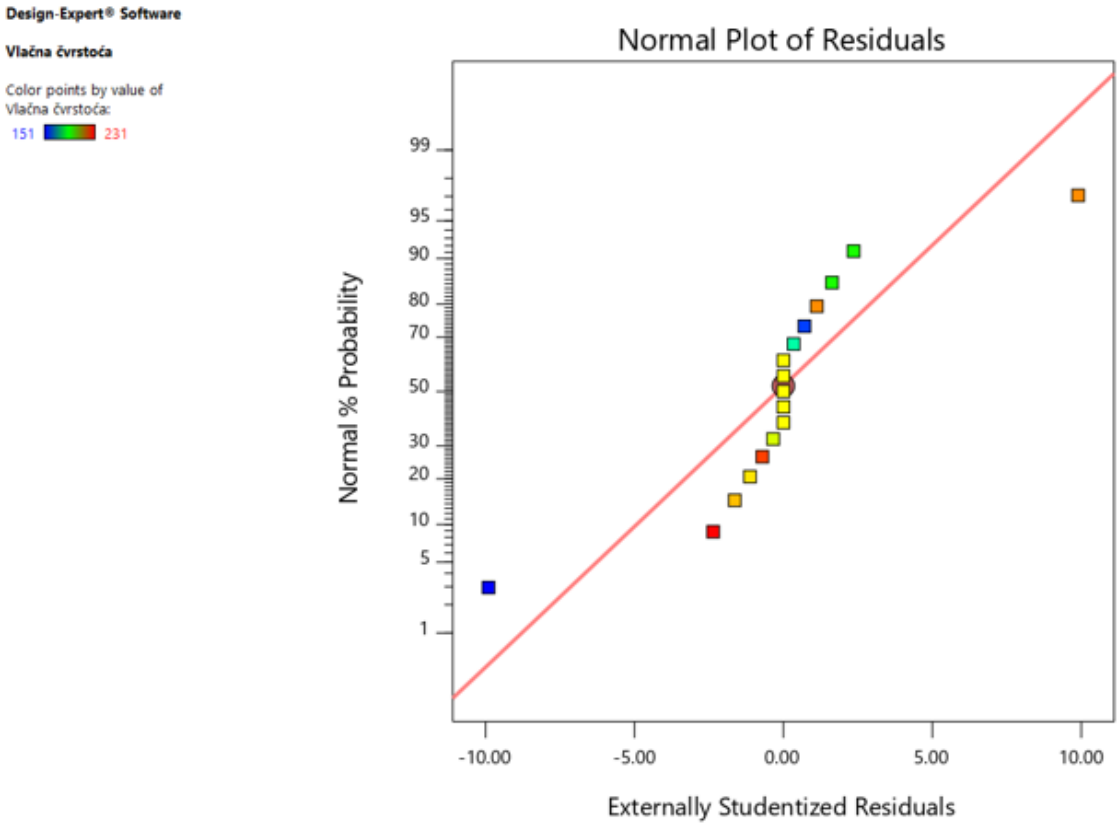
Jednadžba u smislu kodiranih faktora može se koristiti za predviđanje odgovora za određene razine svakog faktora. Prema zadanim postavkama, visoke razine faktora su kodirane s +1, a niske kao -1. Kodirana jednadžba je korisna za identificiranje relativnog utjecaja faktora usporedbom koeficijenata faktora.

Matematički model sa stvarnim vrijednostima izgleda:

Vlačna čvrstoća = - 2809,73 - 104,25 · Debljina žice + 4385.9375 · Visina steznog spajanja vodiča - 464,6875 · Cijena + 375 ·Debljina žice · Visina steznog spajanja vodiča - 135 · Debljina žice · Cijena + 281,25 · Visina steznog spajanja vodiča · Cijena - 306 ·Debljina žice² - 1640,625 · Visina steznog spoja² + 146,875 · Cijena²

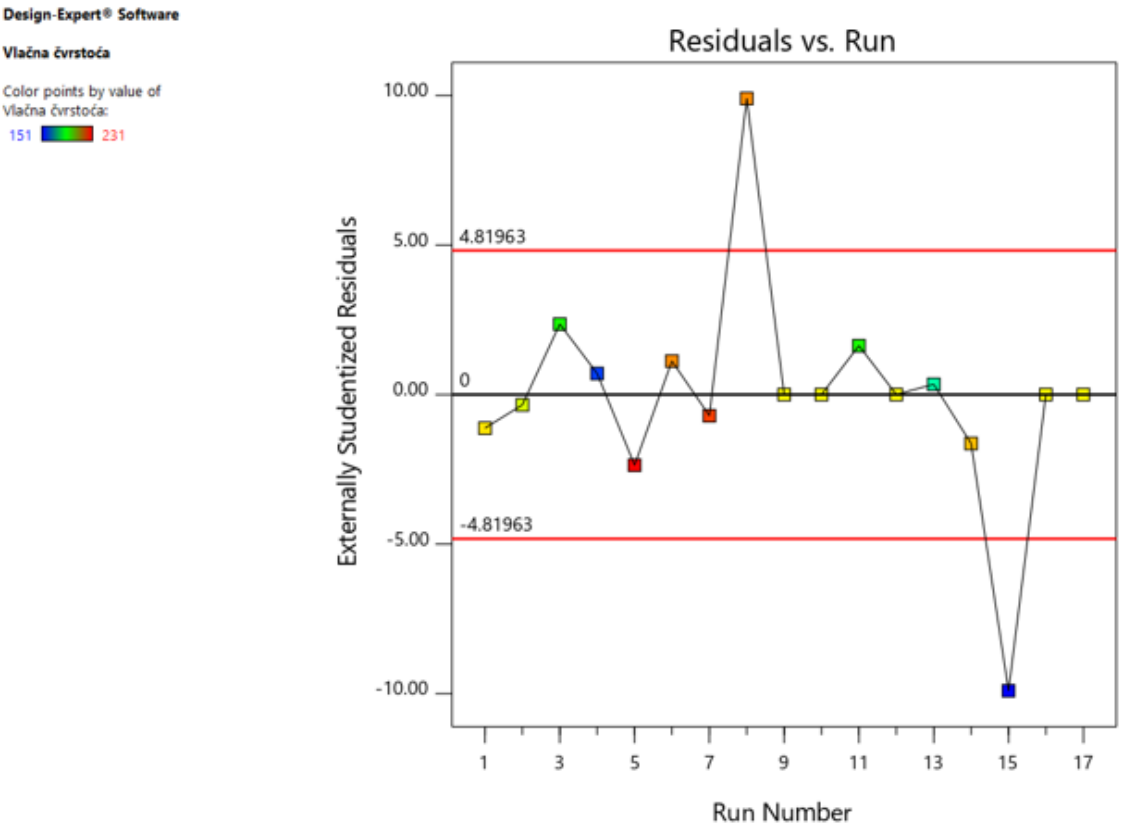
Jednadžba s obzirom na stvarne faktore može se koristiti za predviđanje odgovora za određene razine svakog faktora. Ovdje bi za svaki faktor trebale biti navedene razine u izvornim jedinicama. Ovu jednadžbu ne treba koristiti za određivanje relativnog utjecaja svakog faktora, jer se koeficijenti skaliraju kako bi se prilagodile jedinice svakog faktora, a presretanje nije u središtu projektnog prostora.

Slika 49. prikazuje normalizirani papir vjerojatnosti ostatka za pojedino stanje pokusa. Rezultati vlačne čvrstoće otprilike prate krivulju predviđenog odziva.



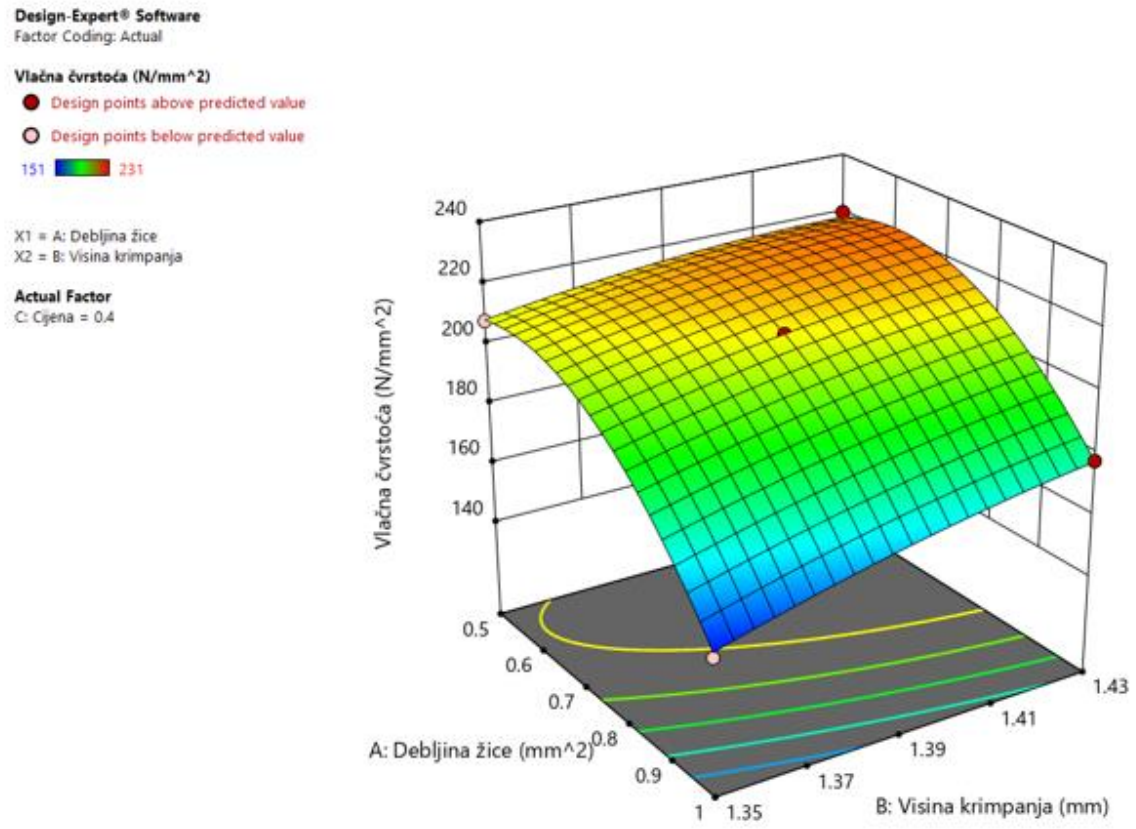
Slika 49. Normalizirani papir vjerojatnosti za vlačnu čvrstoću

Slika 50. prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa. Vidljivo je da postoje dvije pogreške u pozadini.



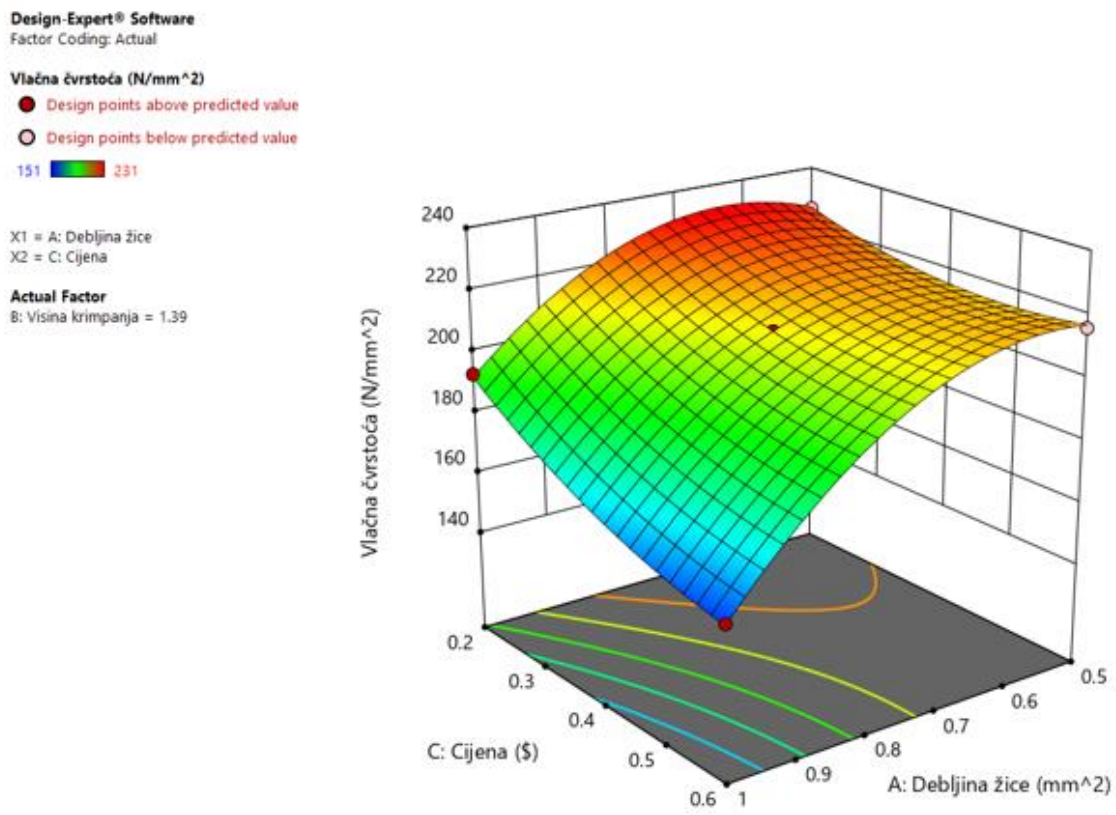
Slika 50. Slučajno rasipanje ostatka za vlačnu čvrstoću

3D graf sa slike 51. prikazuje ponašanje vlačne čvrstoće u odnosu između debljine žice i visine steznog spajanja žice. Vlačna čvrstoća je najmanja u točki gdje je najveća debljina žice, a najmanja visina steznog spajanja žice. Vlačna čvrstoća je najveća u točki gdje je najmanja debljina žice, a najveća visina steznog spajanja žice. Cilj je dobiti što veću vlačnu čvrstoću pa je cilj imati što manju debljinu žice, a što veću visina steznog spajanja žice.



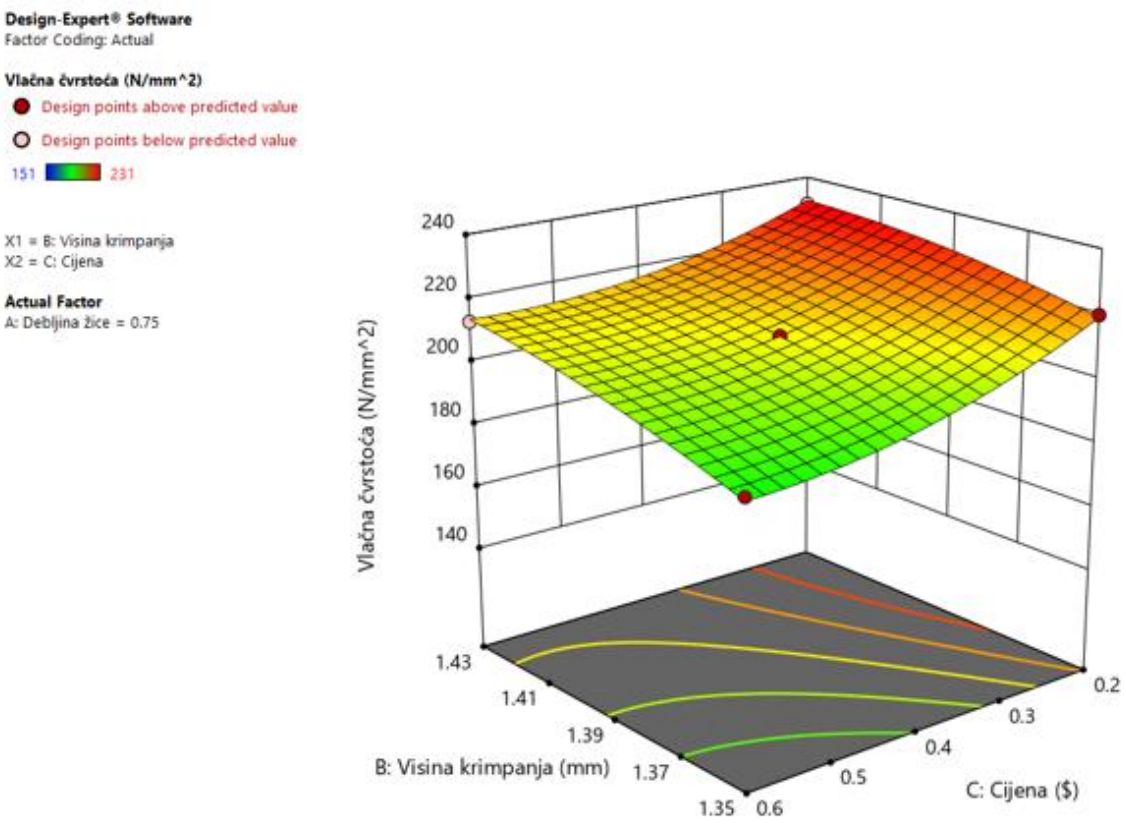
Slika 51. Prikaz odzivne površine čvrstoće pri promjeni visine spoja i debljine žice

3D graf sa slike 52. prikazuje ponašanje vlačne čvrstoće u odnosu cijene i debljine žice. Najmanja vrijednost vlačne čvrstoće iznosi u točki gdje su cijena i debljina žice najveći. Smanjenjem debljine žice dolazi do rasta vlačne čvrstoće. Također smanjenjem cijene raste vlačna čvrstoća.



Slika 52. Prikaz odzivne površine čvrstoće pri promjeni cijene i debljine žice

3D graf sa slike 53. prikazuje ponašanje vlačne čvrstoće u odnosu na cijenu i visinu steznog spajanja žice. Najniža vrijednost vlačne čvrstoće iznosi u točki gdje je najniža visina steznog spajanja žice i najviša cijena. Najviša vrijednost vlačne čvrstoće dobije se kad je najniža cijena. Visina steznog spajanja žice ima manje utjecaja na vlačnu čvrstoću u ovom slučaju, ali bilo bi poželjno da je što veća vrijednost visine steznog spajanja žice.



Slika 53. Prikaz odzivne površine čvrstoće pri promjeni visine spoja i cijene

Cilj je dobiti proizvod sa što većom vlačnom čvrstoćom. Rezultati koji su se dobili metodom odzivne površine nam govore da debljina žice i cijena moraju biti što manji, a visina steznog spajanja žice što veća ako želimo dobiti veću vlačnu čvrstoću.

9.3. PRIPREMA UZORAKA ZA ISPITIVANJE

Uzorci za ispitivanje se sastoje od dva dijela. Prvi dio čini žica. U ovom ispitivanju koriste se tri različite žice. Razlikuju se u debljini. Debljine žice su 0,5 mm², 0,75 mm² i 1 mm². Sve se režu na istu duljinu od 100 mm.

Drugi dio čini terminal. U ovom ispitivanju koriste se tri različita ženska terminala. Iste su veličine i oblika, ali imaju različite prevlake. Također se razlikuju u cijeni. To su 2.8 terminali proizvođača Tyco s prevlakom kositra, srebra ili zlata.

Terminal 1 ima prevlaku od kositra koja se nanosi metodom vrućeg galvaniziranja 1 do 3 mikrometara debljine duž cijelog terminala. Cijena terminala iznosi 0,2 USD.

Kod terminala 2 u kontaktnoj zoni nanosi se 1 do 2 mikrometara sloj nikla, te na njega 1 do 2 mikrometara sloj srebra. U zoni steznog spoja žice nanosi se sloj kositra debljine 1 do 3 mikrometara. Na tijelo terminala ne nanosi se prevlaka srebra. Cijena terminala iznosi 0,4 USD.

Kod terminala 3 u kontaktnoj zoni nanosi se sloj nikla debljine 1 do 2 mikrometara, te na njega minimalno 0,8 mikrometara zlata. Na tijelo terminala ne nanosi se prevlaka zlata. U zoni steznog spoja žice nanosi se sloj kositra 1 do 3 mikrometara debljine. Cijena terminala iznosi 0,6 USD.



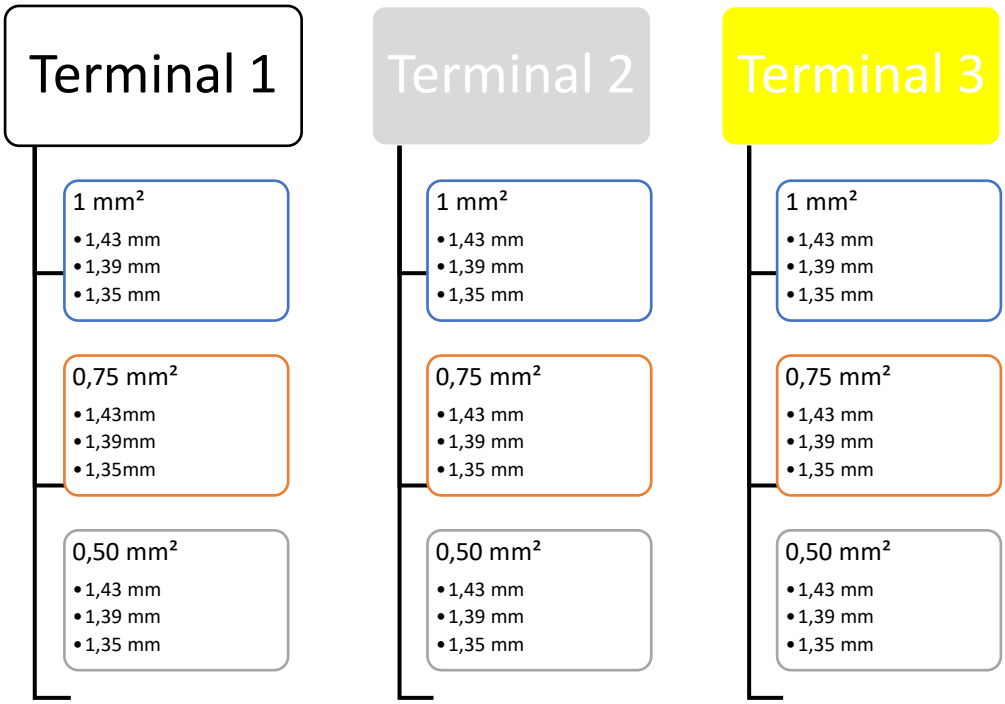
Slika 54. Tri različita terminala

Izrada uzoraka provela se u tvrtki Yazaki Limited Europe u Zagrebu. Žica i terminal se spajaju pomoću steznog spajanja. Stezno spajanje se odvijalo na automatskom uređaju za stezno spajanje vodiča Komax Alpha 360, slika 55. Uređaj je sam uklanjao izolaciju sa žice, određivao

visinu i mjesto steznog spajanja, te je sam stezno spajao žicu i terminal. Te naredbe su se kontrolirale pomoću programa unutar Komax alpha 360 uređaja. Na taj način nastali su uzorci spremni za ispitivanje. Dobili smo 27 različitih kombinacija uzoraka.



Slika 55. Komax Alpha 360



Slika 56. Shema 27 kombinacija



Slika 57. Uzorci spremni za ispitivanje

9.4. REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanja su se provela u tvrtki Yazaki Limited Europe. Prvo ispitivanje koje se provodilo bila je vizualna kontrola uzoraka. Pod vizualnu kontrolu spada gledanje uzoraka golim okom, mjerenje visine i širine zone steznog spoja i izolacijskog steznog spoja, gledanje svjetlosnom mikroskopom i gledanje presjeka zone steznog spoja. Mjerenje visine i širine zone steznog spoja i izolacijskog steznog spoja mjeri se pomičnim mjerilom i mikrometrom.

Uzorak stavljamo pod svjetlosni mikroskop Olympus SZX12 gdje gledamo dijelove stezno spojenog vodiča i izolacijskog stezno spojenog vodiča koje teško možemo vidjeti golim okom, slika 58. Slikaju se tri slike (sa prednje strane, bočne strane i stražnje strane).



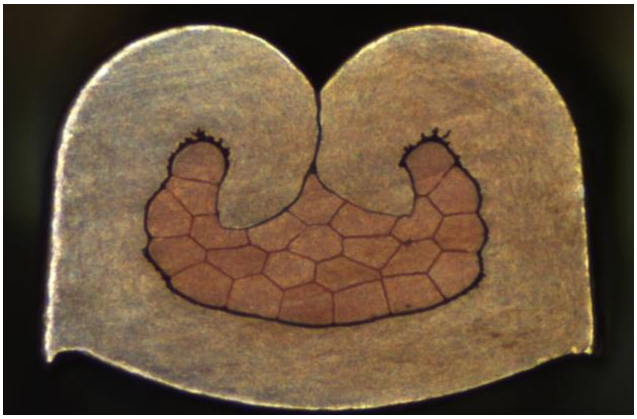
Slika 58. Optički mikroskop Olympus SZX12

Rezanje, gledanje i mjerenje presjeka unutarnje površine zone steznog spoja omogućuje uređaj ML 3212 Micro Lab od tvrtke C-Tec, slika 59.



Slika 59. ML 3212 Micro Lab od C-Tec

Pomoću uređaja ML 3212 Micro Lab izrežemo uzorak u zoni steznog spoja. Nakon rezanja uzorak stavimo ispod mikroskopa koji je spojen s računalom. Na računalu pomoću programa X - Scan PC Software vidimo presjek unutarnje površine zone steznog spoja, tj. kako su se krila terminala deformirala sa žicom za vrijeme steznog spajanja na uređaju Komax Alpfa 360.



Slika 60. Poprečni presjek unutarnje površine zone steznog spoja vodiča

9.4.1. Rezultati mjerenja otpora

Mjerenje otpora na uzorcima radilo se u tvrtki Yazaki Limited Europe u Zgrebu, na uređaju Agilent 4338B miliommetar, slika 61.

Mjerenje otpora se mjeri tako da se jedan ispitivač prikvači na sredini zone steznog spoja, a drugi na sredini kraja žice koji je lemljen. Razmak između njih mora biti 94 mm. Mjerna struja iznosi 100 mA. Uređaj automatski mjeri otpor u miliomima (mΩ). Mjerenje se mjeri prema Volkswagenovoj specifikaciji VW 60330, izdanje 2013-12. Prihvatljiv kriterij je da otpor ne smije biti veći od 1 mΩ. Ukupno je 270 uzoraka za ispitati - za svaku kombinaciju je pripremljeno 10 uzoraka.



Slika 61. Uređaj Agilent 45338B miliommetar

Nakon što se otpor izmjeri uzorci idu na temperaturni šok. Temperaturni šok obavlja se u Vötsch VT³ 7012 S2 komori, slika 62. Svi uzorci se stavljaju u komoru na 100 sati. Prvih 30 minuta temperatura je - 40 ºC, a zatim drugih 30 minuta prelazi na 125 ºC i tako se izmjenjuje 100 puta. Uzorci nakon temperaturnog šoka opet idu na mjerenje otpora da se vidi dolazi li do

promjene u rezultatima. Cilj je da ne dolazi do promjene otpora prije i poslije temperaturnog šoka.



Slika 62. Vötsch VT³ 7012 S2 komora

U sljedećim tablicama prikazani su rezultati srednjih vrijednosti izmjerenih otpora ispitanih uzoraka prije i poslije temperaturnog šoka.

Tablica 7. Rezultati srednjih vrijednosti otpora za 0,50 mm² debljine žice prije i poslije temperaturnog šoka

0,50 mm²									
	TERMINAL 1			TERMINAL 2			TERMINAL 3		
Visina steznog spajanja vodiča, mm	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43
$\bar{R}$ prije, mΩ	0,20	0,24	0,28	0,77	1,17	1,55	0,77	0,88	1,07
$\bar{R}$ poslije, mΩ	0,31	0,37	0,72	0,98	1,64	2,47	0,85	1,17	1,84

S povećanjem visine steznog spoja žice raste i otpor. Može se vidjeti da otpor ovisi i o vrsti prevlake terminala. Otpor kod terminala 1 (prevlaka kositra) puno je manji u odnosu na terminal 2 (srebrna prevlaka) i terminal 3 (zlatna prevlaka). Otpori kod terminala sa srebrnom i zlatnom prevlakom veći su nego što je kriterij tako da su oni pali test (označeni crvenom bojom). Jedino terminal 1 zadovoljava zadane uvjete. Ali nakon temperaturnog šoka i ponovnog mjerenja otpor ne ostaje približno isti. Rezultati se dosta povećavaju kod svih visina. Ovo je pokazatelj da spoj 0,50 mm² žice i 2.8 terminala i nije najbolja opcija.

Tablica 8. Rezultati srednjih vrijednosti otpora za 0,75 mm² debljine žice prije i poslije temperaturnog šoka

0,75 mm²									
	TERMINAL 1			TERMINAL 2			TERMINAL 3		
Visina steznog spajanja vodiča, mm	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43
$\bar{R}$ prije, mΩ	0,10	0,11	0,11	0,66	0,64	0,64	0,64	0,67	0,70
$\bar{R}$ poslije, mΩ	0,11	0,11	0,12	0,69	0,64	0,67	0,62	0,65	0,73

Svi uzorci su prošli test. Visina steznog spajanja žice nema većeg utjecaja na promjene otpora. Ali prevlaka terminala ima. Terminal 1 pokazuje puno manji otpor od terminala 2 i terminala 3. Terminal 2 i terminal 3 otprilike imaju iste rezultate. Otpor je otprilike isti prije i poslije temperaturnog šoka. To su pokazatelji da je spoj između 0,75 mm² žice i 2.8 terminala stabilan.

Tablica 9. Rezultati srednjih vrijednosti otpora za 1,00 mm² debljine žice prije i poslije temperaturnog šoka

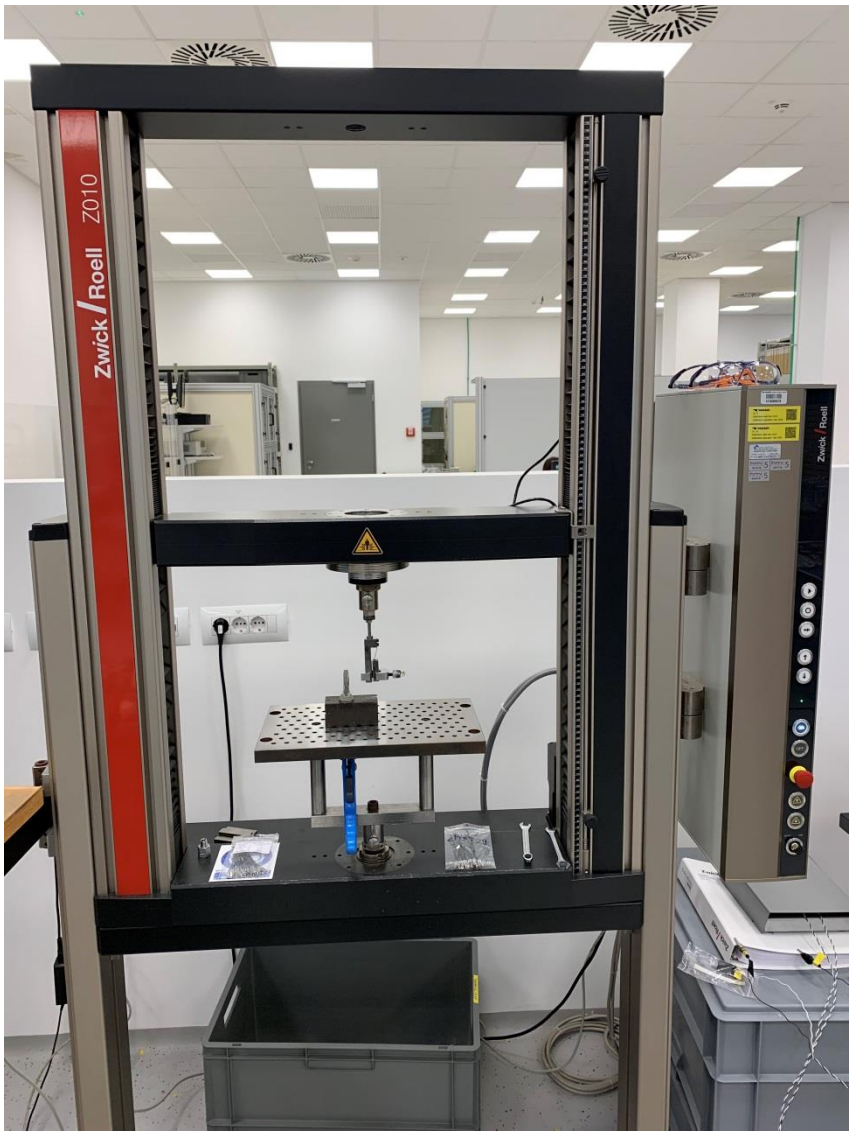
1,00 mm²									
	TERMINAL 1			TERMINAL 2			TERMINAL 3		
Visina steznog spajanja vodiča, mm	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43
$\bar{R}$ prije, mΩ	0,07	0,07	0,07	0,63	0,68	0,69	0,65	0,66	0,67
$\bar{R}$ poslije, mΩ	0,06	0,06	0,07	0,62	0,64	0,67	0,62	0,63	0,62

Svi uzorci su prošli test. Visina steznog spajanja žice nema većeg utjecaja na promjenu otpora. Prevlake terminala imaju utjecaja. Terminal 1pokazuje najbolje rezultate. Terminal 2 i terminal 3 imaju otprilike iste rezultate. Otpor je otprilike isti prije i poslije temperaturnog šoka. To su pokazatelji da je spoj između 1,00 mm² žice i 2.8 terminala stabilan.

Uspoređujući debljine žica vidimo da se povećanjem debljine žice smanjuje otpor. Visina steznog spajanja žice nema nekog velikog utjecaja, ali vrsta prevlake ima. Terminal 1 se pokazao kao najbolja opcija.

9.4.2. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

Ispitivanje vlačne čvrstoće na ispitnim uzorcima provelo se u tvrtki Yazaki Limited Europe u Zagrebu, na kidalici ZWICK ROELL Z010, slika 63. Ispitivanje vlačne čvrstoće se radi tako da se jedan kraj zakvači za vrat terminala, prije glave terminala, a stezaljkom se stegne žica na sredini, slika 64. Kidalica povećanjem sile rasteže uzorak sve dok ne dođe do pucanja. Na ekranu dobijemo dijagram sila-produljenje gdje se može vidjeti odnos sile i produljenja te pomoću tih vrijednosti izračunati vlačnu čvrstoću. Ukupno je 540 uzoraka za ispitati. Svaka kombinacija ima 20 uzoraka.

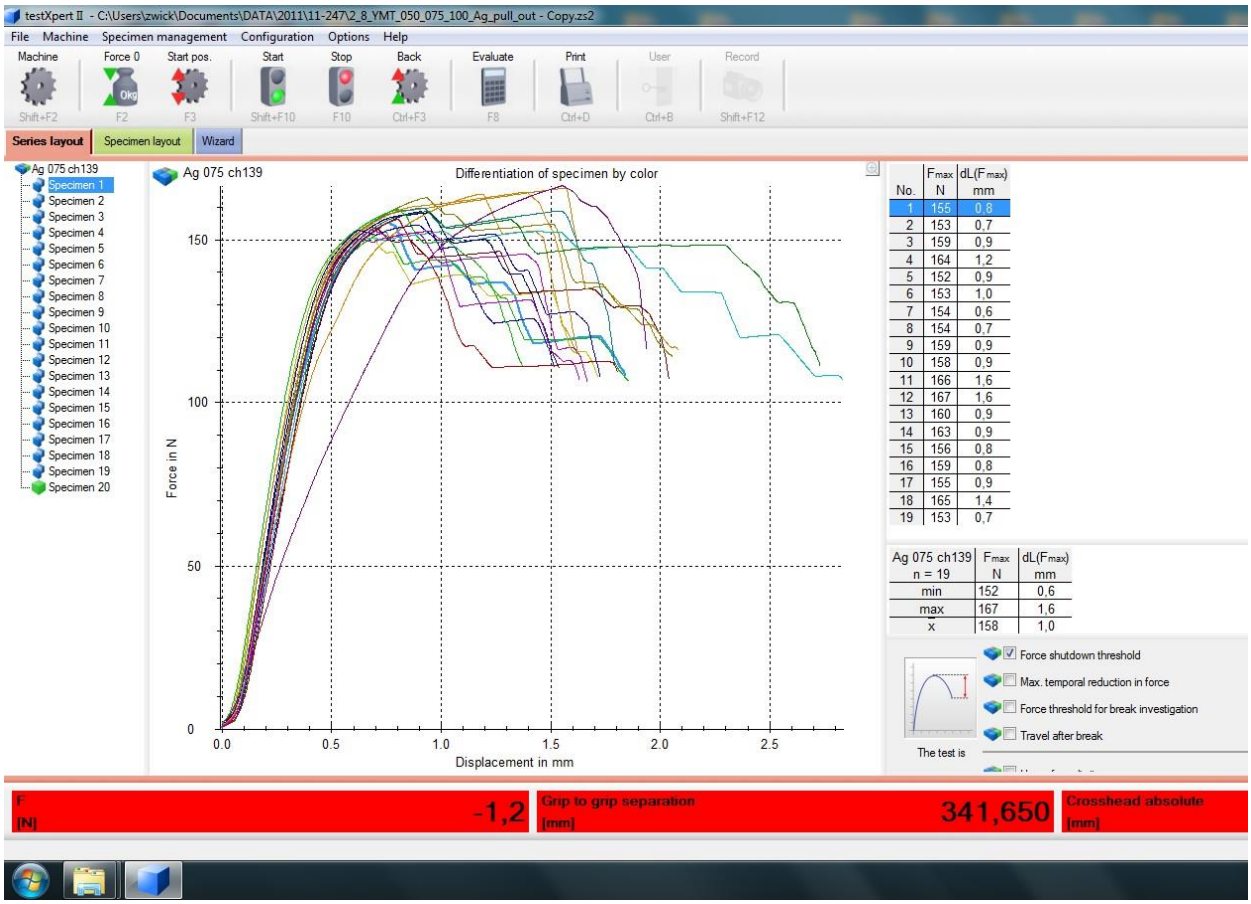


Slika 63. Kidalica Zwick Roell Z010



Slika 64. Postavljanje ispitnog uzorka na kidalici

Slika 653. prikazuje dijagram sila-naprezanje za žicu 0,75 mm² debljine, 1,39 mm visinu steznog spajanja žice i terminal sa srebrnom prevlakom. Krivulje dijagrama većinom izgledaju slično za sve ispitne uzorke, uz različite vrijednosti sile i produljenja, pa se dijagrami sila-naprezanje ostalih ispitnih kombinacija nalaze u prilogu.



Slika 65. Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja vodiča, srebrna prevlaka

Sljedeće tablice prikazuju vrijednosti maksimalne sile, maksimalnog produljenja i vlačne čvrstoće svih ispitnih uzoraka radi lakše usporedbe rezultata i lakšeg donošenja zaključaka.

Tablica 10. Rezultati maksimalne sile, maksimalnog produljenja i vlačne čvrstoće za žicu površine 0,50 mm²

0,50 mm²									
	TERMINAL 1			TERMINAL 2			TERMINAL 3		
Visina steznog spajanja vodiča, mm	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43
$\boldsymbol{F_{max}}$, N	112	113	115	104	108	110	103	108	110
ΔL, mm	3	3	3,2	1,6	2,7	3,2	1,5	2	2,5
R_m , N/mm²	224	226	230	208	216	220	206	216	220

Povećanjem visine steznog spajanja žice povećava se sila, produljenje i vlačna čvrstoća. Vlačna čvrstoća ima najveće vrijednosti kod terminala 1 (prevlaka kositra), dok kod terminala 2 (prevlaka srebra) i terminala 3 (prevlaka zlata) ima malo manje vrijednosti. Terminal 2 i terminal 3 imaju slične, skoro iste rezultate.

Tablica 11. Rezultati maksimalne sile, maksimalnog produljenja i vlačne čvrstoće za žicu površine 0,75 mm²

0,75 mm²									
	TERMINAL 1			TERMINAL 2			TERMINAL 3		
Visina steznog spajanja vodiča, mm	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43
$\boldsymbol{F_{max}}$, N	165	168	173	149	158	163	145	152	160
ΔL, mm	1,5	1,9	2,5	0,9	1	1,5	0,9	0,9	1,3
R_m , N/mm²	220	224	231	199	211	217	193	203	213

Povećanjem visine steznog spajanja žice povećava se sila, produljenje i vlačna čvrstoća. Vlačna čvrstoća ima najveće vrijednosti kod terminala 1, dok kod terminala 2 i terminala 3 ima malo manje vrijednosti. Terminal 2 i terminal 3 imaju slične, skoro iste rezultate.

Tablica 12. Rezultati maksimalne sile, maksimalnog produljenja i vlačne čvrstoće za žicu površine 1,00 mm²

1,00 mm²									
	TERMINAL 1			TERMINAL 2			TERMINAL 3		
Visina steznog spajanja vodiča, mm	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43	1,35	1,39	1,43
F_{max} , N	182	193	201	151	167	178	143	156	175
ΔL, mm	1	1,3	1,8	0,6	0,7	0,8	0,6	0,6	0,9
R_m, N/mm²	182	193	201	151	167	178	143	156	175

Povećanjem visine steznog spajanja žice povećava se sila, produljenje i vlačna čvrstoća. Vlačna čvrstoća ima najveće vrijednosti kod terminala 1 sa, dok kod terminala 2 i terminala 3 ima malo manje vrijednosti. Terminal 1 i terminal 2 imaju slične, skoro iste rezultate.

Što je veća debljina žice to je veća maksimalna sila i manje produljenje.

Rezultati pokazuju da ako je manja debljina žice i veća visina steznog spajanja žice, vlačna čvrstoća je veća. Terminal 1 pokazuje najveće vrijednosti za vlačnu čvrstoću.

10. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih i dobivenih rezultata, može se zaključiti sljedeće:

1. Rezultati koji su se dobili metodom odzivne površine nam govore da debljina žice mora biti što veća, a visina steznog spajanja žice i cijena moraju biti manje što da bi se dobile što manje vrijednosti otpora.
2. Rezultati koji se dobili metodom odzivne površine nam govore da debljina žice i cijena moraju biti što manji, a visina steznog spajanja žice što veća da bi se dobile što veće vrijednosti vlačne čvrstoće.
3. Rezultati ispitivanja otpora na uzorcima pokazuju da je otpor manji ako je debljina žice veća. Visina steznog spajanja žice nema velikog utjecaja u ovom slučaju. Terminal 1 (terminal s prevlakom kositra) se pokazao kao najbolji vodič i najjeftiniji.
4. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na uzorcima pokazuju da za što veću vlačnu čvrstoću debljina žice treba biti što manja, a visina steznog spajanja žice što veća. Terminal 1 (terminal s prevlakom kositra) pokazuje najveće vrijednosti vlačne čvrstoće i najjeftiniji je.
5. Usporedbom rezultata koje smo dobili metodom odzivne površine i rezultata ispitivanja uzoraka možemo reći da smo dobili iste rezultate i zaključke. To pokazuje da je metoda odzivne površine točno pretpostavila.
6. Terminal 1 (terminal s prevlakom kositra) na debljini žice 0,75 mm^2 i visini steznog spajanja žice na visinu 1,43 mm daje najbolja mehanička, električna i eksploatacijska svojstva, uz što manje troškove. Visina steznog spajanja žice nije toliko značajan faktor jer su i druge dvije visine (1,35 mm i 1,39 mm) pokazale jako dobre, gotovo iste rezultate.

LITERATURA

[1] Suvremena automobilska industrija među najvećima u svijetu, http://advanta.hr/automobilska-industrija-u-svijetu-i-hrvatskoj/suvremena-svjetska-autoindustrija/ 7.10.2020.

[2] Auto industrija prognozira pad prodaje automobila u EU, pogledajte kakve se brojke očekuju ove godine – tportal, https://www.tportal.hr/autozona/clanak/auto-industrija-prognozira-pad-prodaje-automobila-u-eu-pogledajte-kakve-se-brojke-ocekuju-ove-godine-20190628 7.10.2020.

[3] Daimler Corporate Website; https://www.daimler.com/company/tradition/company-history/1885-1886 7.10.2020.

[4] Automotive industry – Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Automotive_industry#cite_note-4 7.10.2020.

[5] Automobilska industrija, https://www.eplan.hr/hr/industrija/automobilska-industrija/ 7.10.2020.

[6] Automobilska industrija - Invest Croatia, http://investcroatia.gov.hr/sektori/automobilska-industrija/ 7.10.2020.

[7] 2018's Top 10 Tech Cars Rimac Concept One - IEEE Spectrum, https://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/2018s-top-ten-tech-cars-rimac-concept-one 7.10.2020.

[8] Prasad Yadav, Akshay Shinde, Yogesh Gangurde, Pankaj Patil: "Review on weight reduction in automobile" India 2016. https://www.ijarse.com/images/fullpdf/1459238105_407B.pdf 7.10.2020.

[9] P. Villanueva – Rey: Journal of Cleaner Production "Wiring in the automobile industry: Life cycle assessment of an innovative cable solution" 2018. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261832729X 7.10. 2020.

[10] Električni vodič - Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_vodi%C4%8D 7.10.2020.

[11] Zbrinjavanje_PO-predavanje-VII-, https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/ZBRINJAVANJE_PO-predavanje-VII-.pdf 9.10.2020.

[12] Nirmala Cable - Manufacturer of AB Cable Accessories and cable conductor, https://www.exportersindia.com/nirmala-cable-4306161/cable-conductor-3819334 8.10.2020.

[13] Cable sizing and selection _ 12 volt planet, https://www.12voltplanet.co.uk/cable-sizing-selection 8.10.2020.

[14] What is Wire - Cable Gauge (AWG) - Audioholics, https://www.audioholics.com/audio-video-cables/power-cables/what-is-wire-cable-gauge-awg 8.10.2020.

[15] Know-How Notes_ Automotive Wiring Guide » NAPA Know How Blog, http://knowhow.napaonline.com/know-how-notes-automotive-wiring-guide/ 8.10.2020.

[16] Types of insulation used on automotive wire _ American Autowire, https://www.americanautowire.com/view-faq/types-of-insulation-used-on-automotive-wire/ 8.10.2020.

[17] Irena Žmak: Recikliranje materijala, www.fsb.unizg.hr/recikliranje, 8.10.2020.

[18] Yazaki Europe: Automotive Products, https://www.yazaki-europe.com/index 8.10.2020.

[19] Wire Terminals - WiringProducts. Ltd. https://www.wiringproducts.com/wire-terminals 12.10.2020.

[20] Electronics, Cars, Fashion, Collectibles & More _ eBay, https://www.ebay.com/itm/10-25pcs-M3-M4-M5-M6-M8-M10-M13-Insulated-Crimp-Ring-Terminals-Wire-Connectors-/131465713921 12.10.2020.

[21] Male & Female Push On Terminals, http://www.gcaltd.co.uk/shop/earth-straps-lugs-ferrules/male-female-push-on-terminals/ 12.10.2020.

[22] Electrical Terminals, https://www.delcity.net/store/Terminals/ 12.10.2020.

[23] 50pc Female+Male Insulated Electric Connector Crimp Bullet terminal for 22_16AWG Mixed Color - Newegg.com, https://www.newegg.com/p/0X6-04PA-00063 12.10.2020.

[24] Rajak AK, Kore SD.: "Experimental investigation of aluminium–copper wire crimping with electromagnetic process: its advantages over conventional process." J Manuf Process 2017;26:57–66. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.01.009. 12.10.2020.

[25] Applicators - Keys to Quality Crimping, https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/application-tooling/global/at-296393-2.pdf 13.10.2020.

[26] How to Use a Crimping Tool_ 8 Steps (with Pictures) – wikiHow, https://m.wikihow.com/Use-a-Crimping-Tool 18.10.2020.

[27] Ocean Side-Feed Applicators, https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Specification+Or+Standard%7F408-10389%7FS%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_SS_408-10389_S.pdf%7F2151104-2 19.10.2020.

[28] Crimping Applicators _ Schäfer Werkzeug- und Sondermaschinenbau GmbH, https://www.schaefer.biz/en/products/crimping-applicators/ 19.10.2020.

[29] Cable crimping machine - Alpha 477 - Komax - fully-automatic _ pneumatic, https://www.directindustry.com/prod/komax/product-25064-435092 19.10.2020.

[30] terminals-and-splices-whitepaper, https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/industrial/global/1-1773953-1-terminals-and-splices-whitepaper.pdf 19.10.2020.

[31] Home Current Issue -_ Industry Articles, http://www.us-tech.com/RelId/959878/ISvars/default/Applicators_Getting_to_the_Heart_of_the_Crimping_Process 19.10.2020.

[32] qual_crimp, https://www.shearwater.com/wp-content/uploads/2012/08/qual_crimp.pdf 20.10.2020.

[33] Pomično mjerilo – Wikipedia, https://bs.wikipedia.org/wiki/Pomi%C4%8Dno_mjerilo 20.10.2020.

[34] Mikrometarski vijak – Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Mikrometarski_vijak 20.10.2020.

[35] Optički merni instrumenti MarVision - CSI Support, https://csisupport.rs/dimenzionalna-metrologija/metroloski-merni-sistemi/opticki-merni-instrumenti-marvision/ 23.10.2020.

[36] tbo quality crimp handbook, https://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/molex%20pdfs/tbo%20quality%20crimp%20handbook.pdf 20.10.2020.

[37] Copper and electricity. Resistance and resisitivty. http://resources.schoolscience.co.uk/CDA/16plus/copelech2pg1 20.10.2020.

[38] Lemljenje, http://os-jakovlje.skole.hr/upload/os-jakovlje/images/static3/2337/File/lemljenje.pdf 20.10.2020.

[39] 09_07_2014_Diplomski_rad_Marko_Topalusic, http://repozitorij.fsb.hr/2808/1/09_07_2014_Diplomski_rad_Marko_Topalusic.pdf 14.11.2020.

[40] Cajner, H.: Višekriterijsko adaptivno oblikovanje planova pokusa. Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2011. http://repozitorij.fsb.hr/1411/, 1.11.2020.

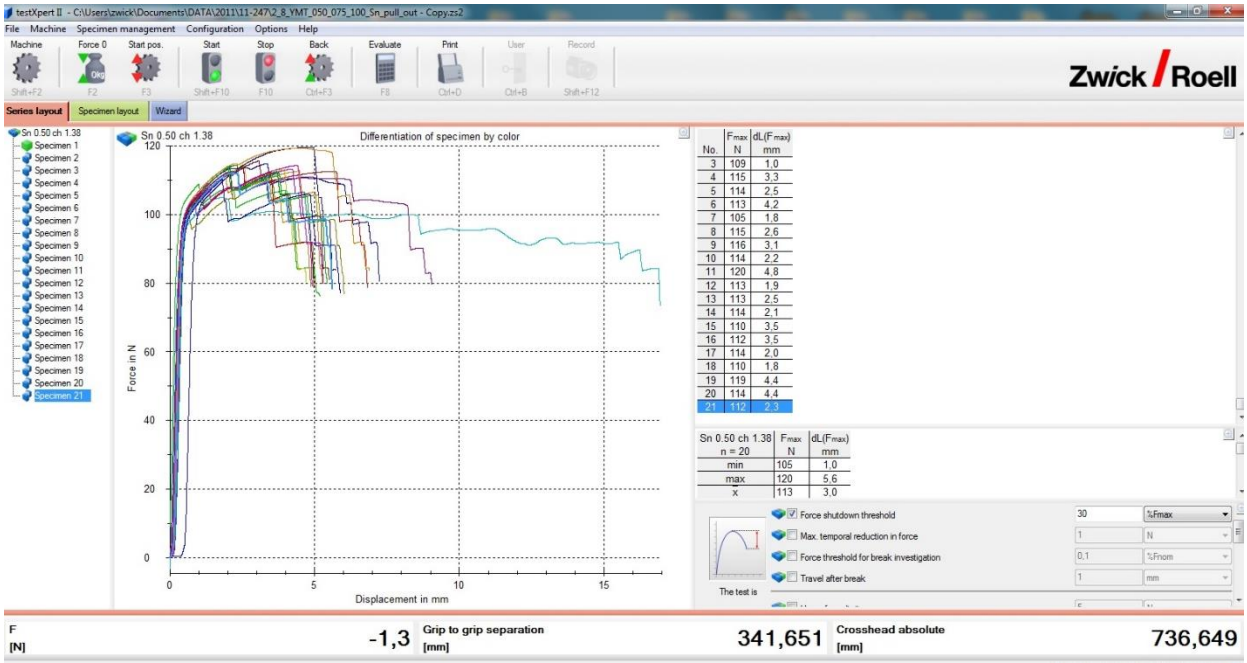
PRILOZI

I. CD-R disk

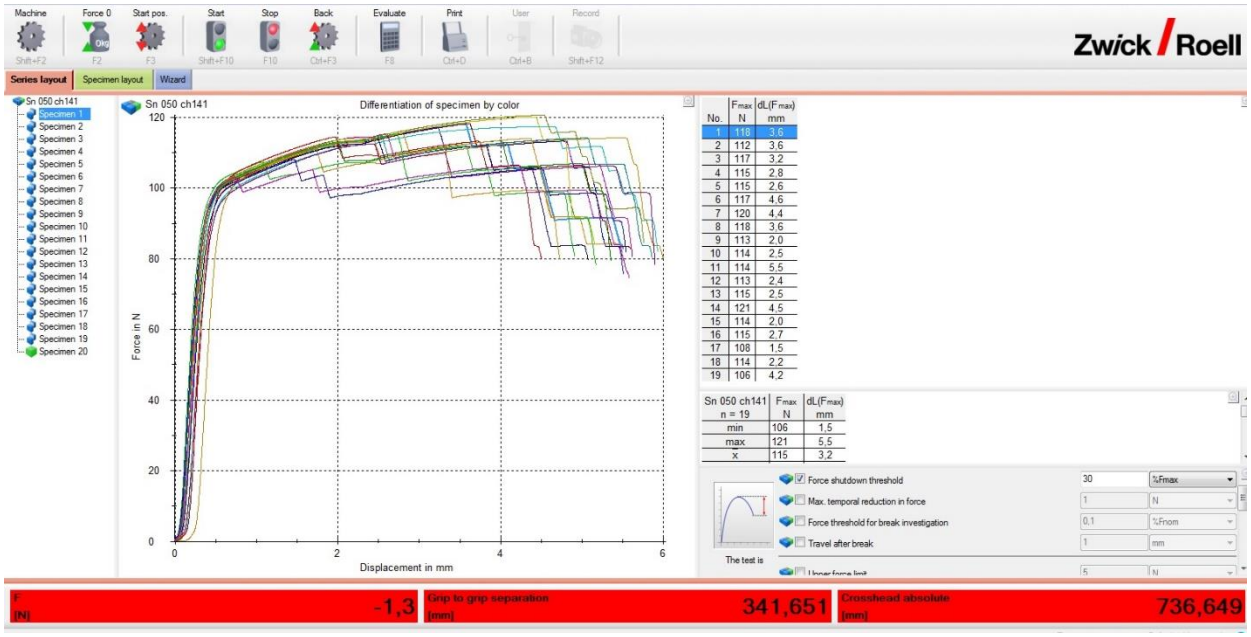
II. Slike u nastavku prikazuju dijagrame sila-naprezanje za različite veličine poprečnog presjeka žice, različite ispitivane visine steznog spajanja žice i različite materijale prevlaka terminala.



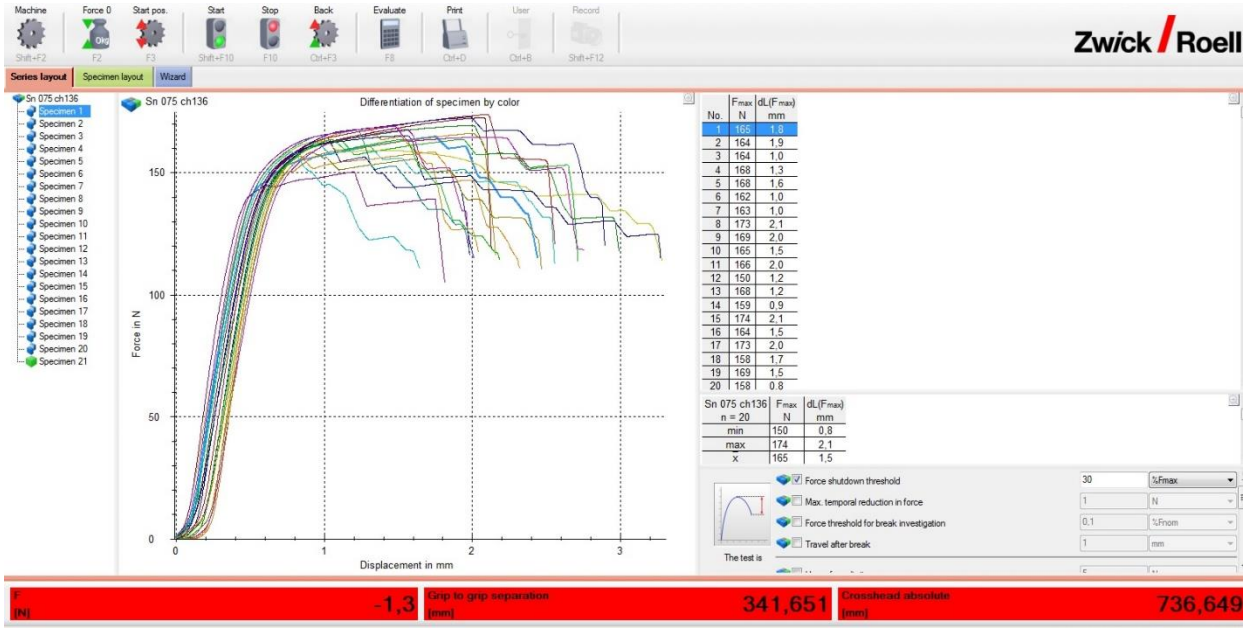
Dijagram sila-produljenje za 0,50 mm² žicu, 1,35 mm visina steznog spoja, prevlaka kositra



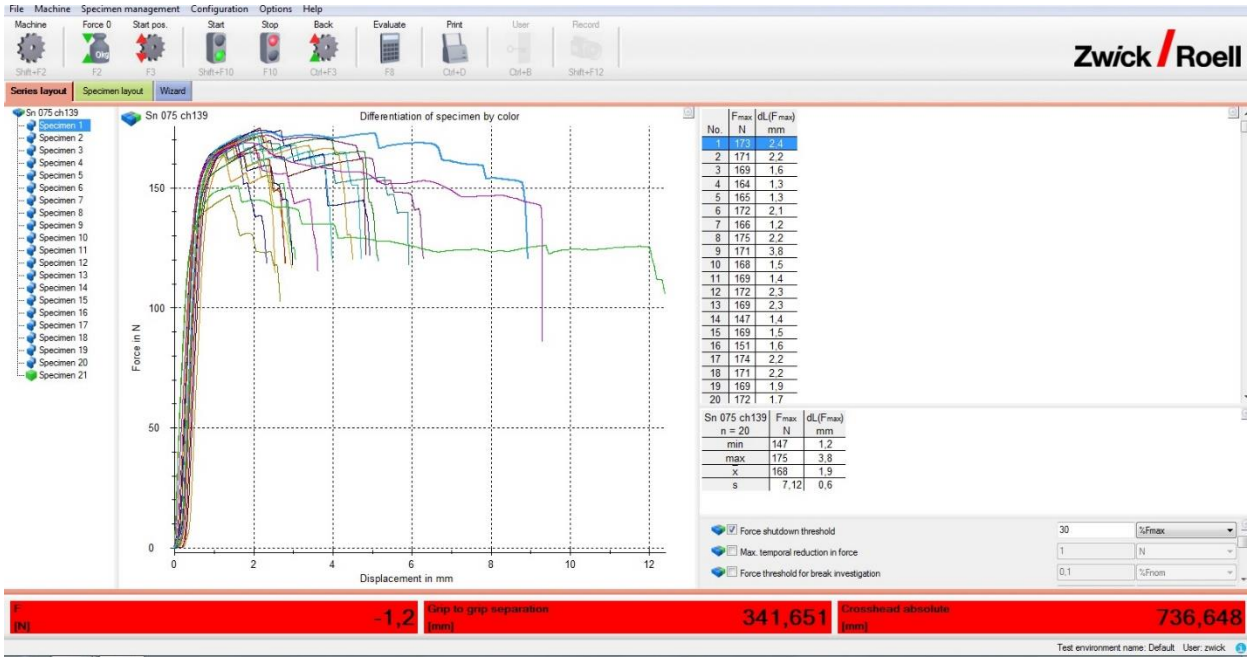
Dijagram sila-produljenje za 0,50 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja, prevlaka kositra



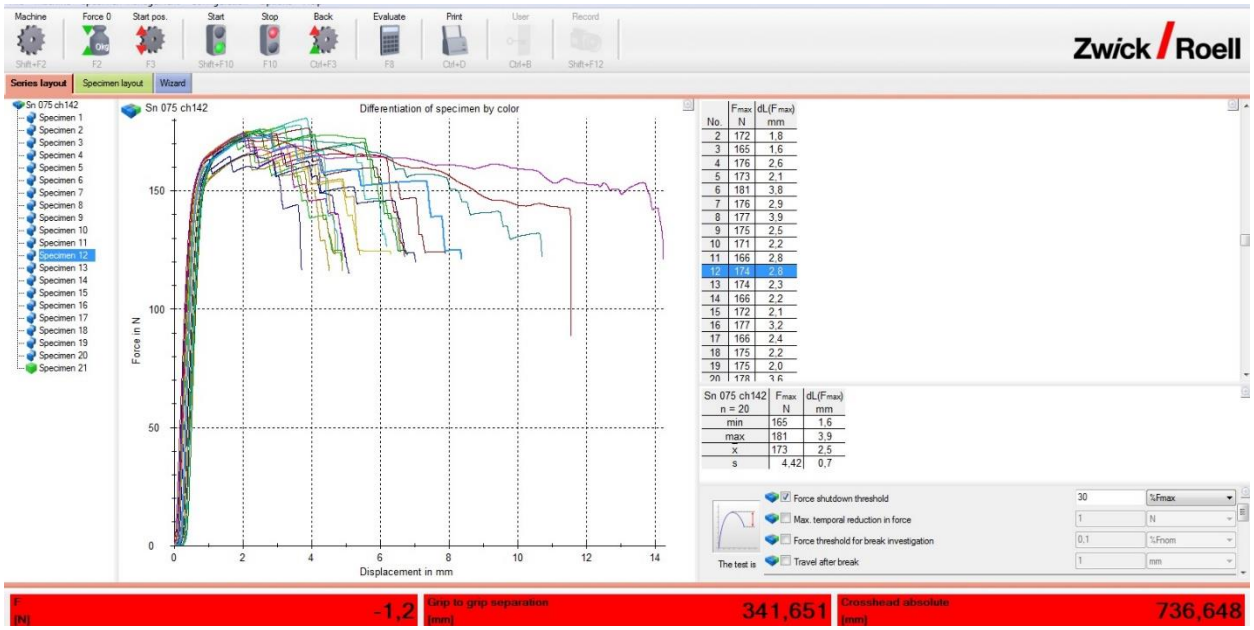
Dijagram sila-produljenje za 0,50 mm² žicu, 1,43 mm visina steznog spoja, prevlaka kositra



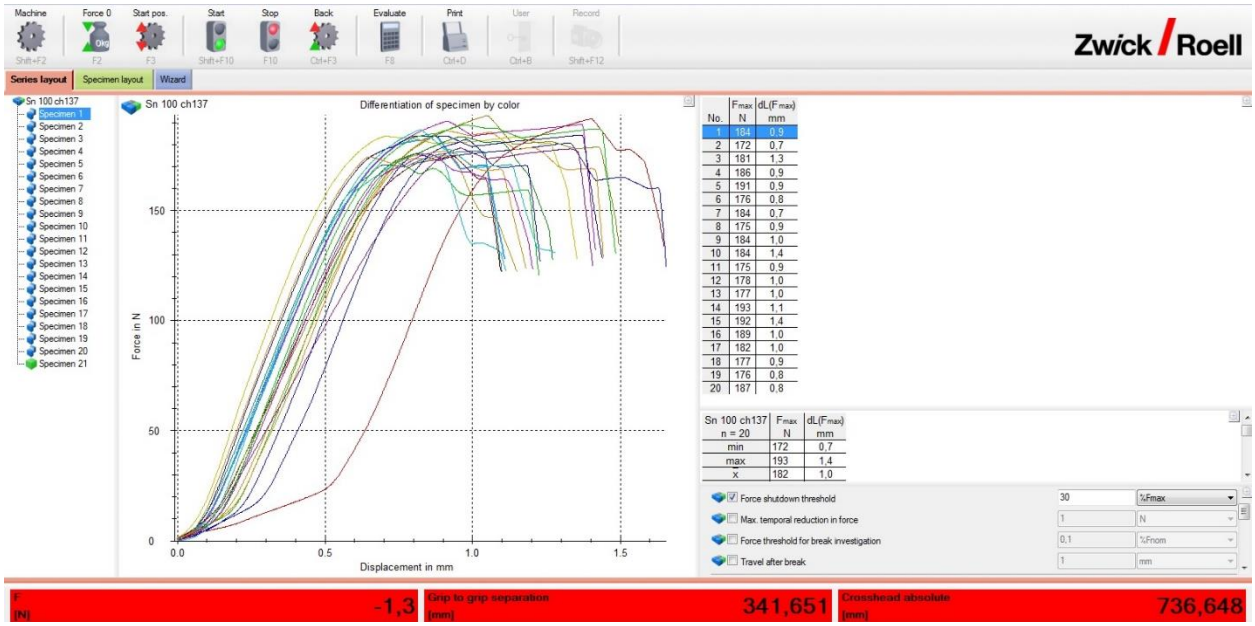
Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,35 mm visina steznog spoja, prevlaka kositra



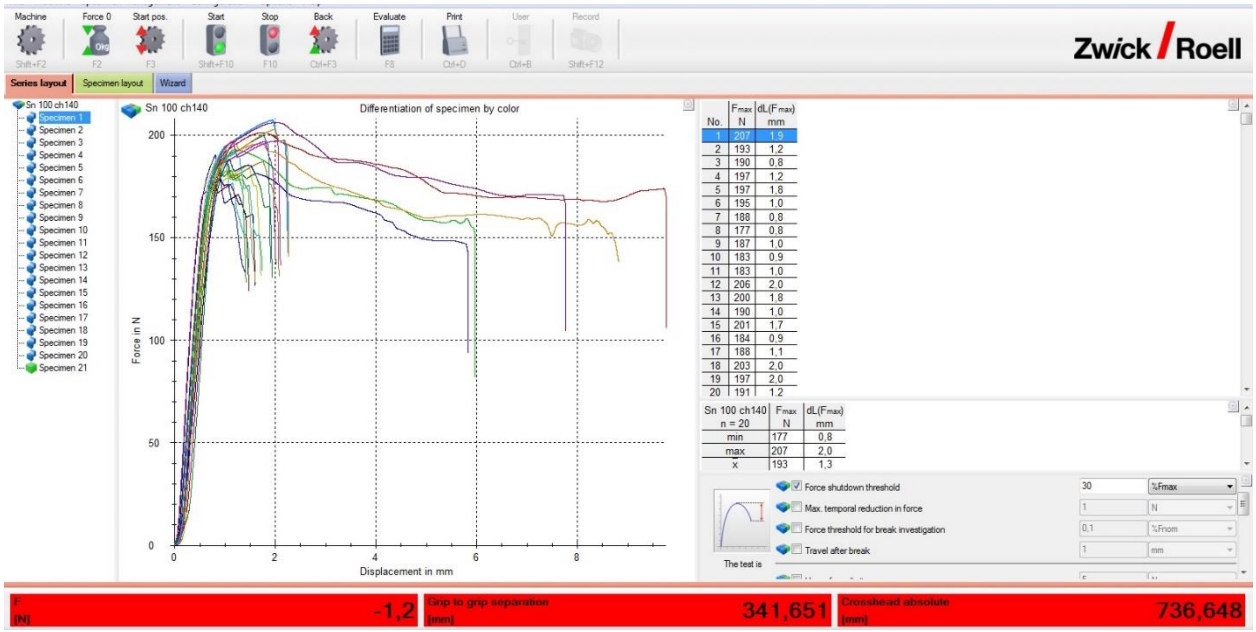
Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja, prevlaka kositra



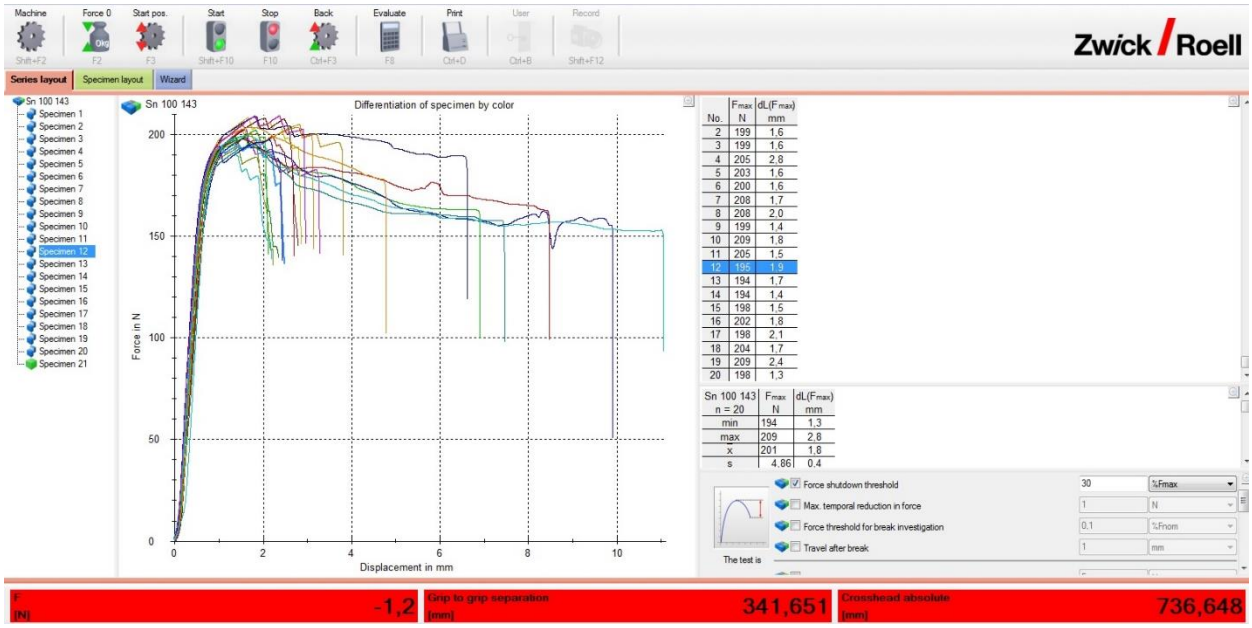
Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,43 mm visina steznog spoja, prevlaka kositra



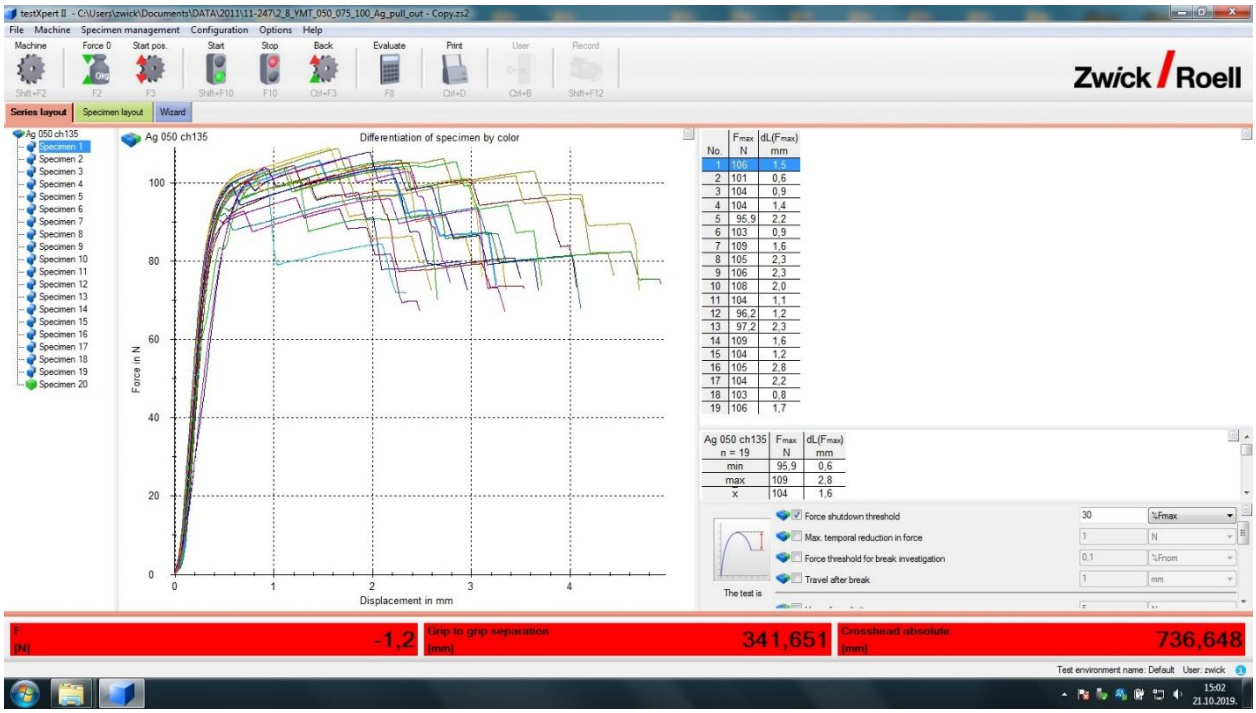
Dijagram sila-produljenje za 1,00 mm² žicu, 1,35 mm visina steznog spoja, prevlaka kositra



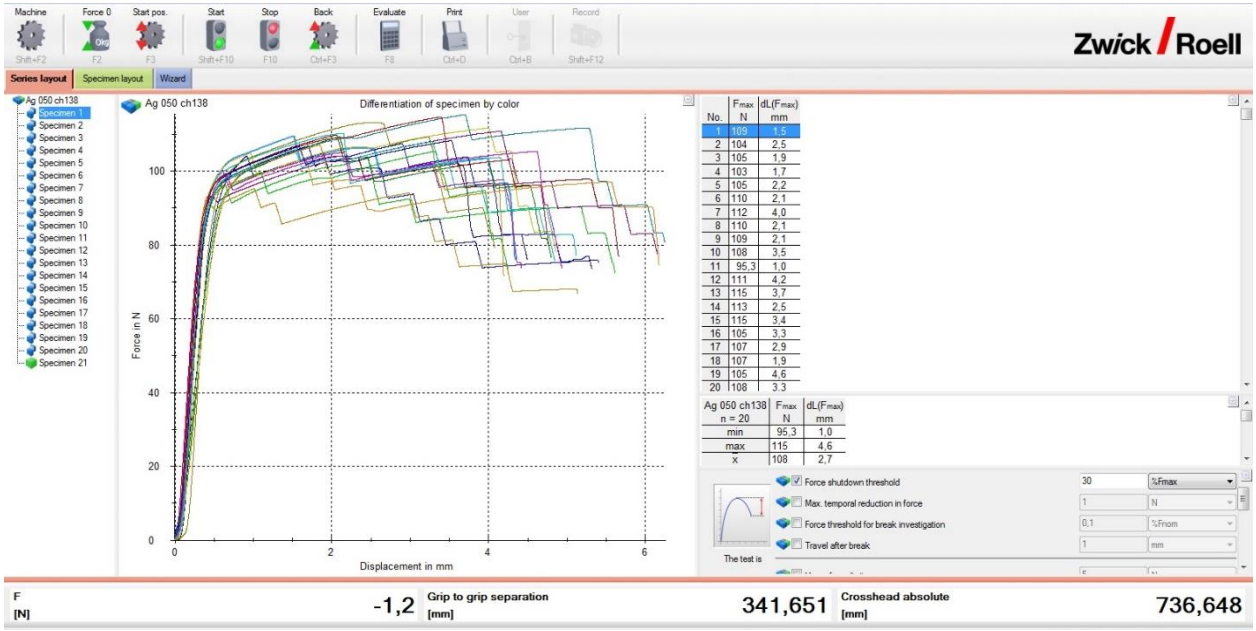
Dijagram sila-produljenje za 1,00 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja, prevlaka kositra



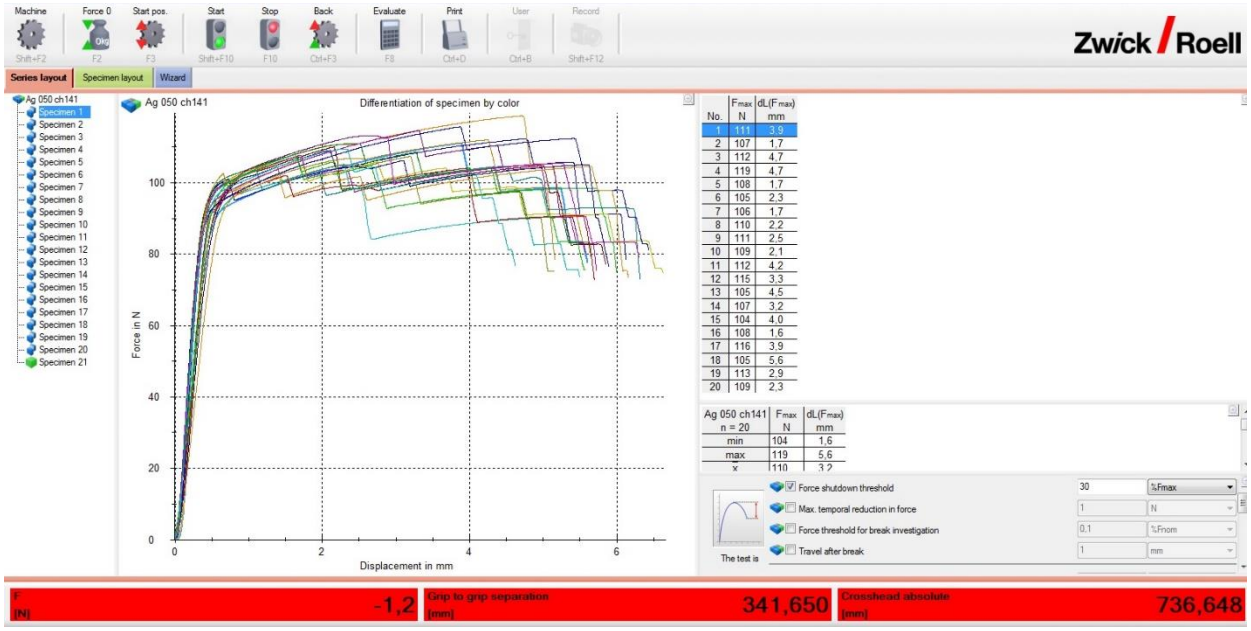
Dijagram sila-produljenje za 1,00 mm² žicu, 1,43 mm visina steznog spoja, prevlaka kositra



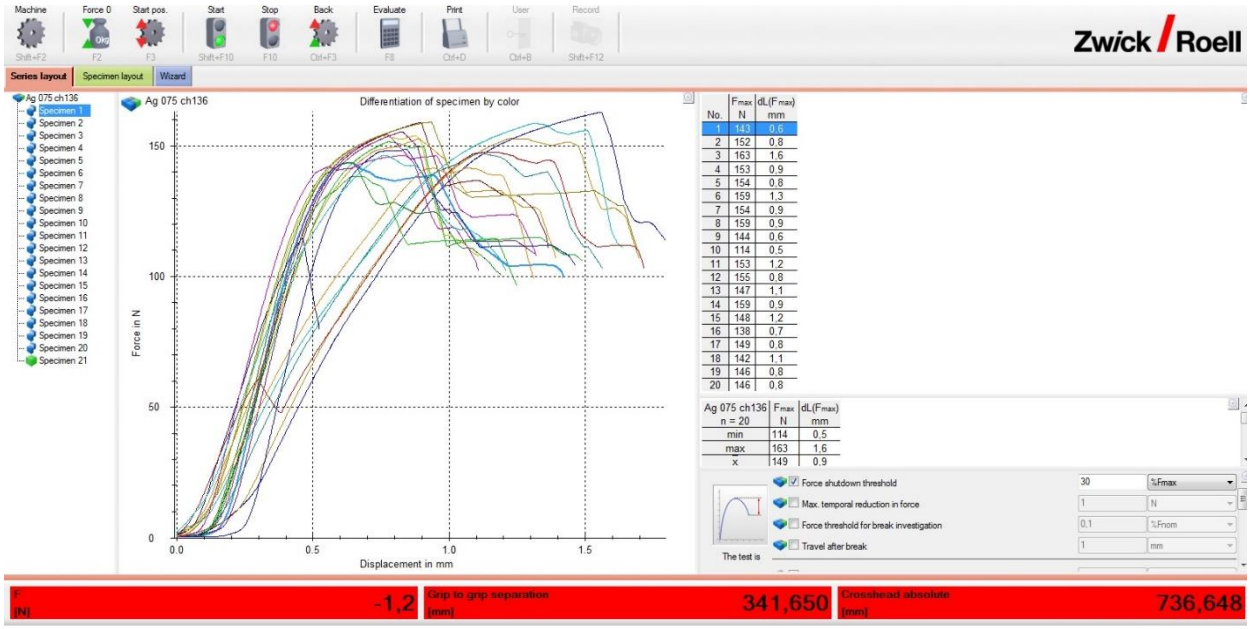
Dijagram sila-produljenje za 0,50 mm² žicu, 1,35 mm visina steznog spoja, prevlaka srebra



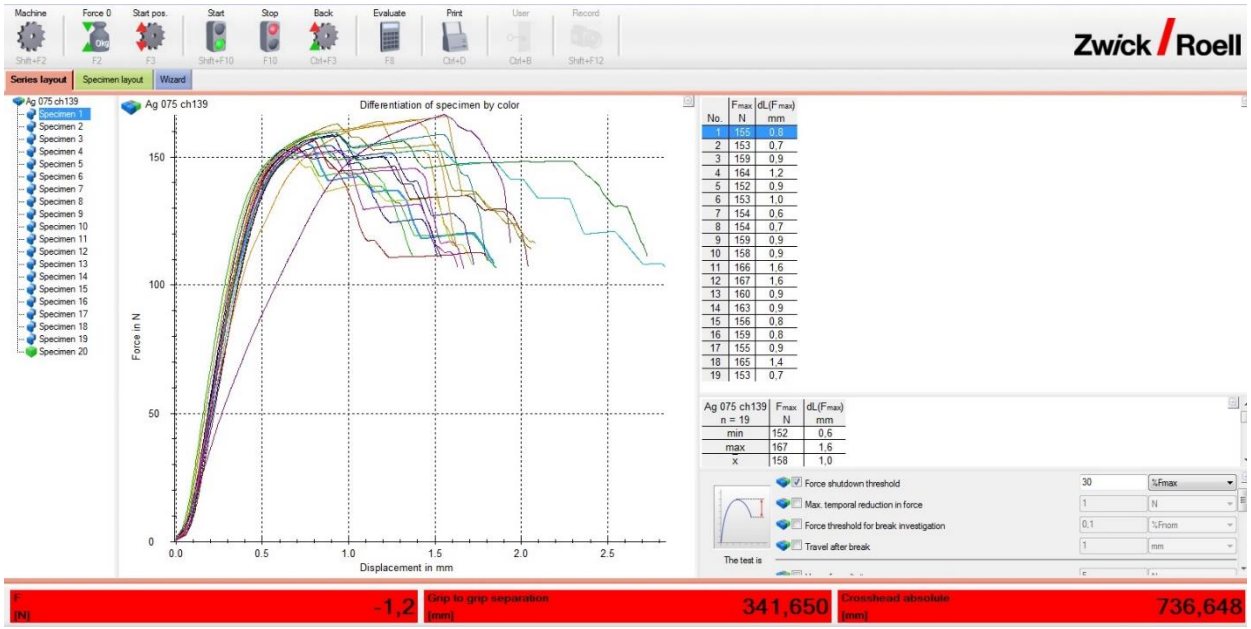
Dijagram sila-produljenje za 0,50 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja, prevlaka srebra



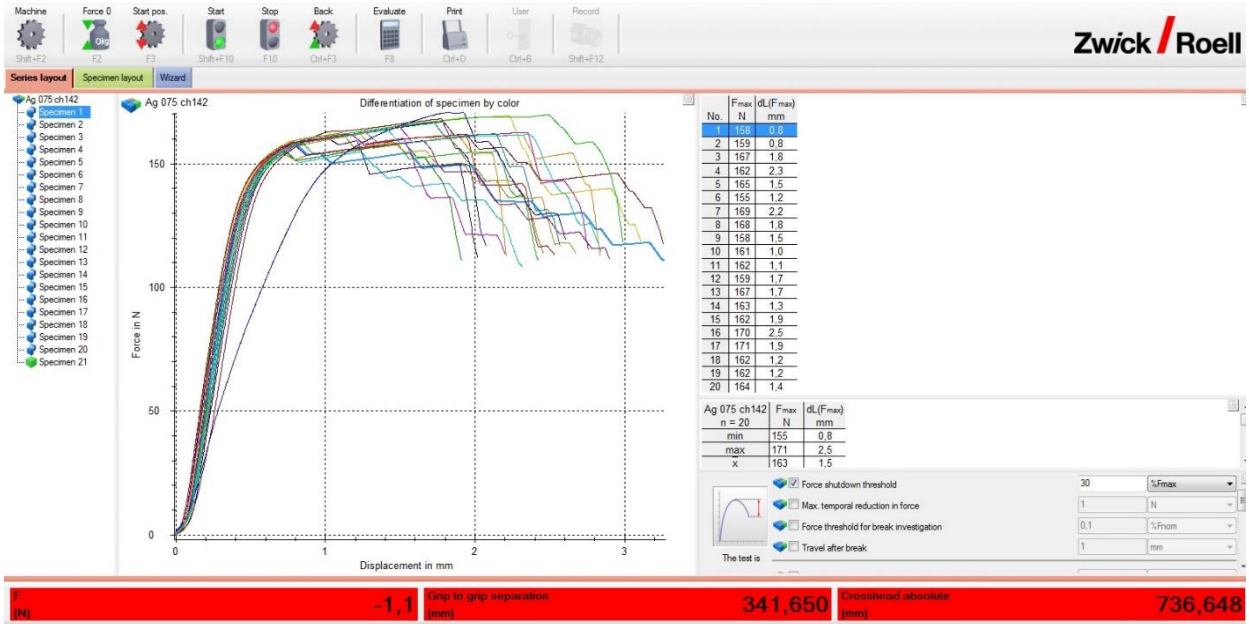
Dijagram sila-produljenje za 0,50 mm² žicu, 1,43 mm visina steznog spoja, prevlaka srebra



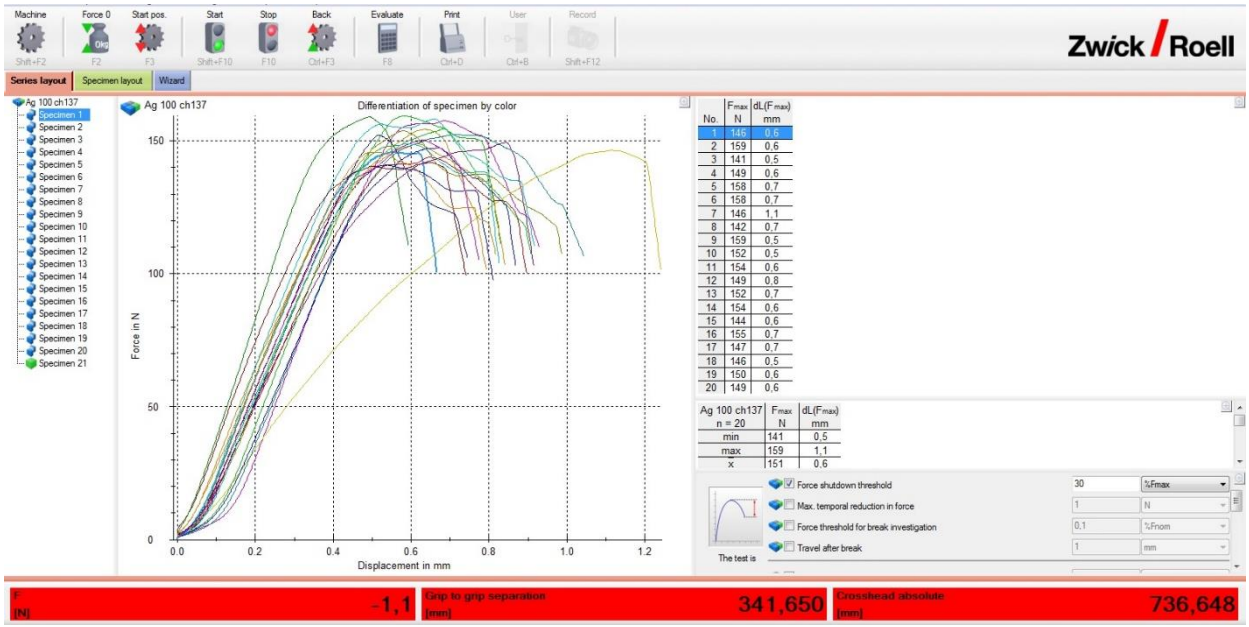
Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,35 mm visina steznog spoja, prevlaka srebra



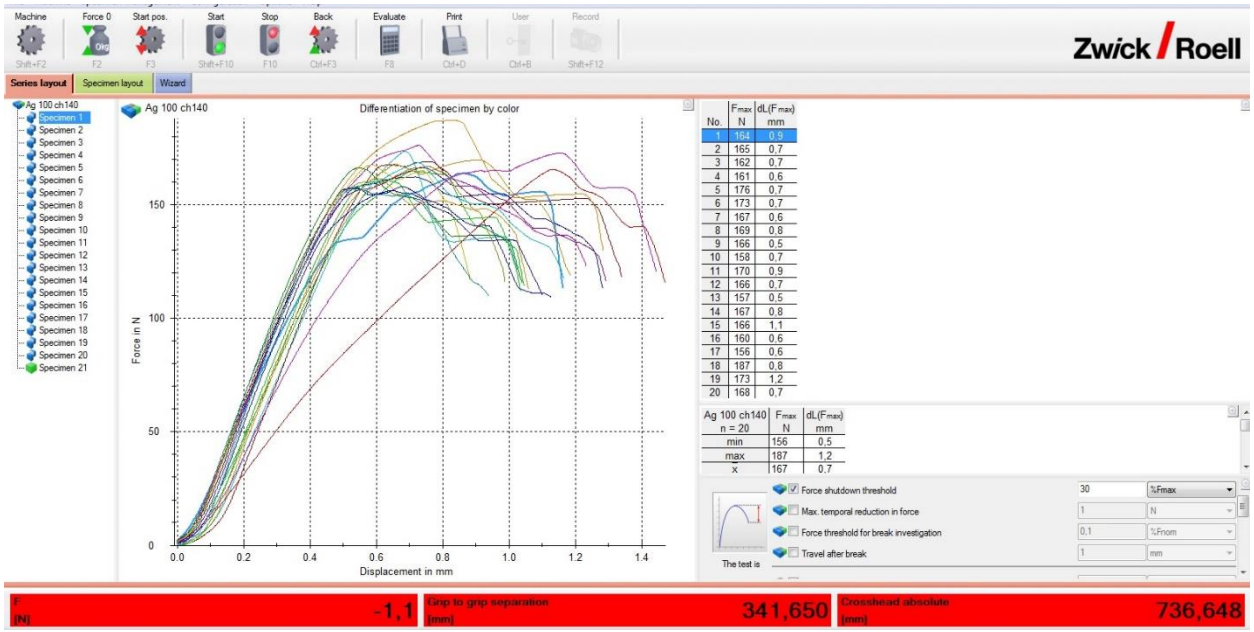
Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja, prevlaka srebra



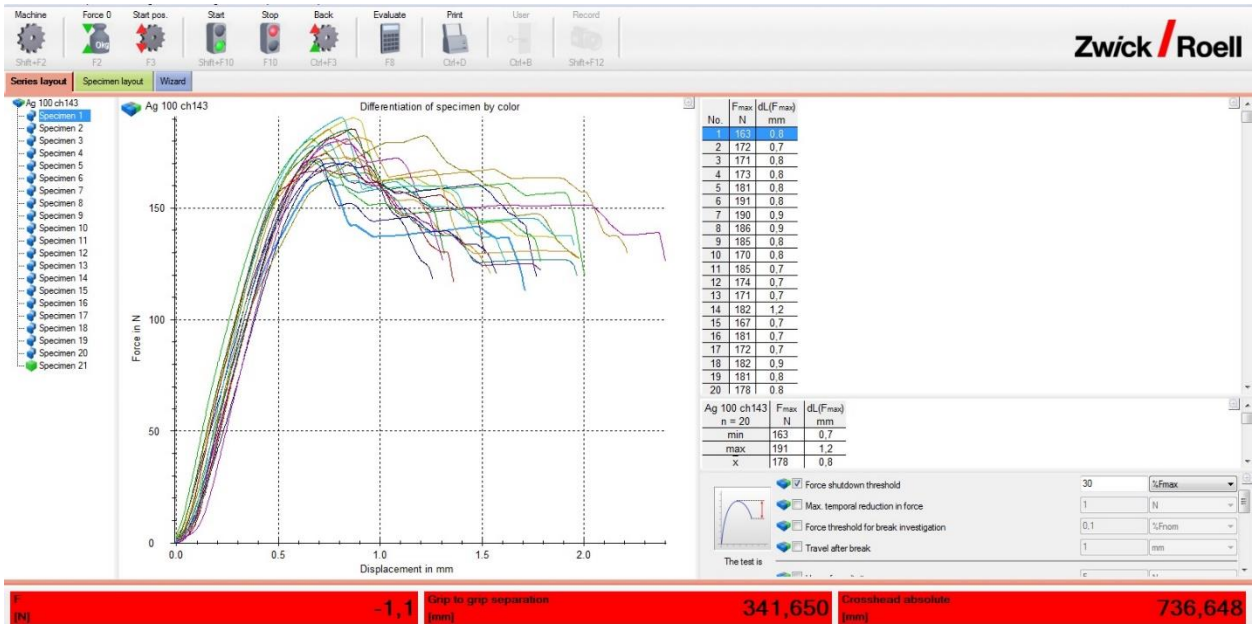
Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,43 mm visina steznog spoja, prevlaka srebra



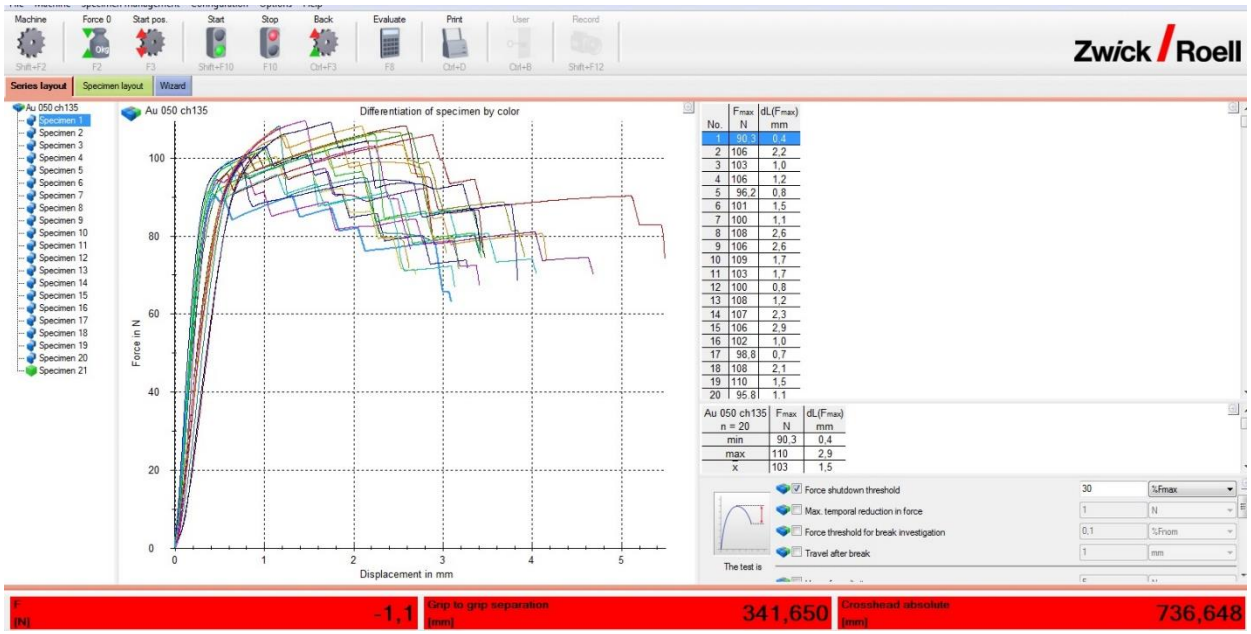
Dijagram sila-produljenje za 1,00 mm² žicu, 1,35 mm visina steznog spoja, prevlaka srebra



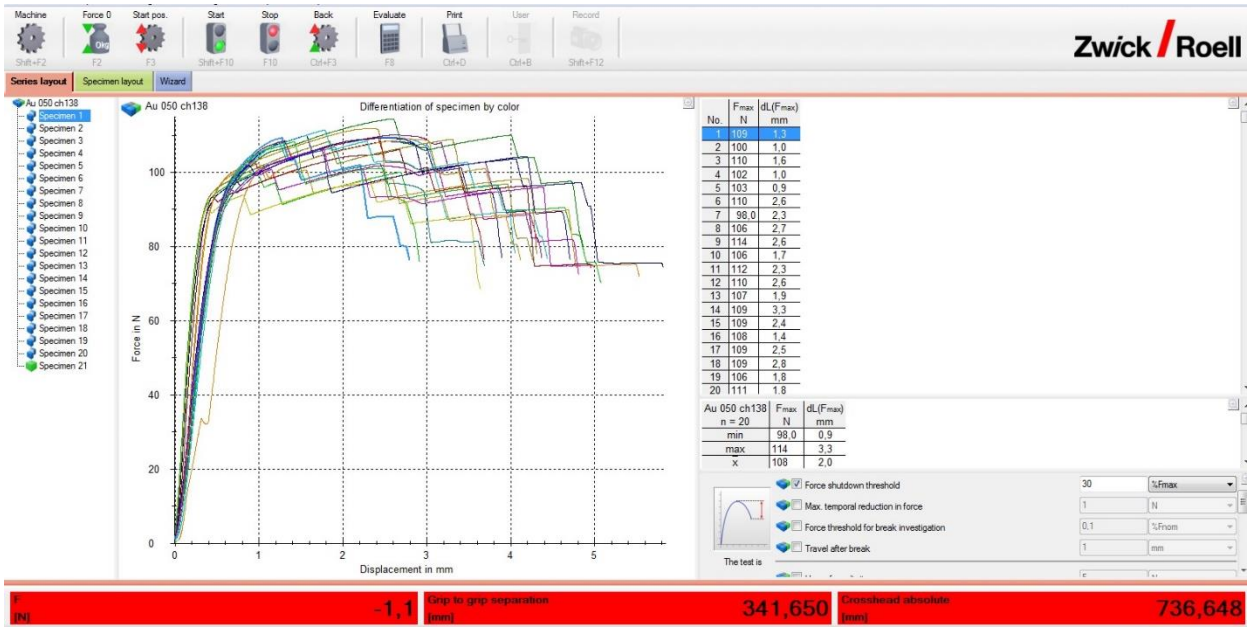
Dijagram sila-produljenje za 1,00 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja, prevlaka srebra



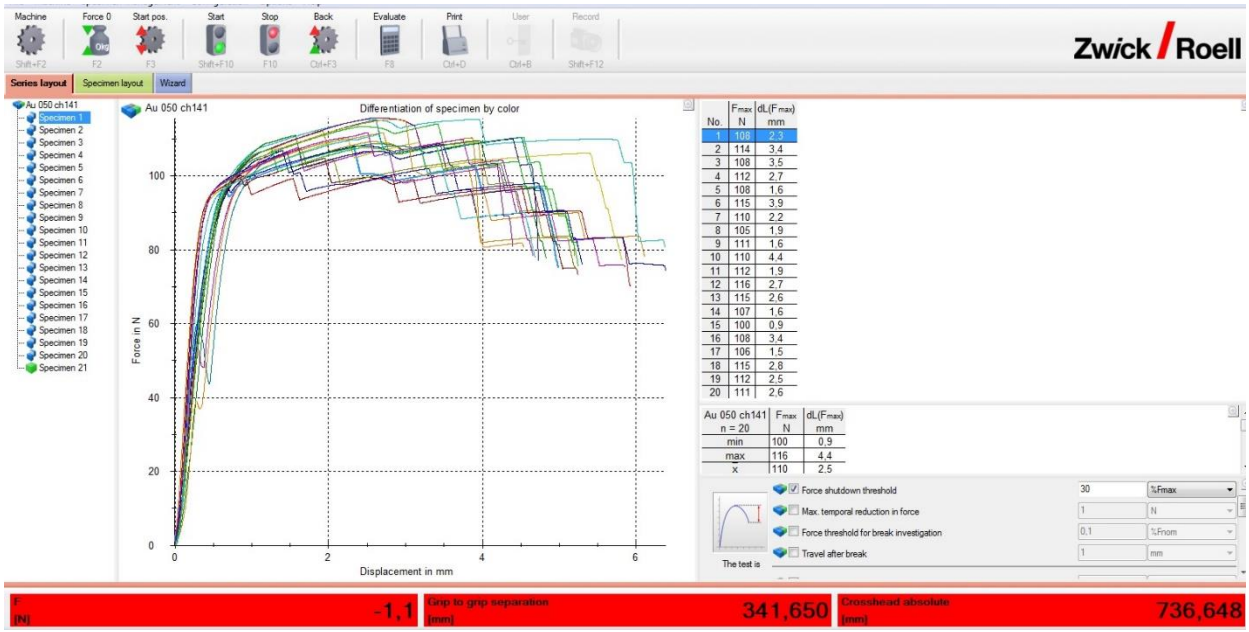
Dijagram sila-produljenje za 1,00 mm² žicu, 1,43 mm visina steznog spoja, prevlaka srebra



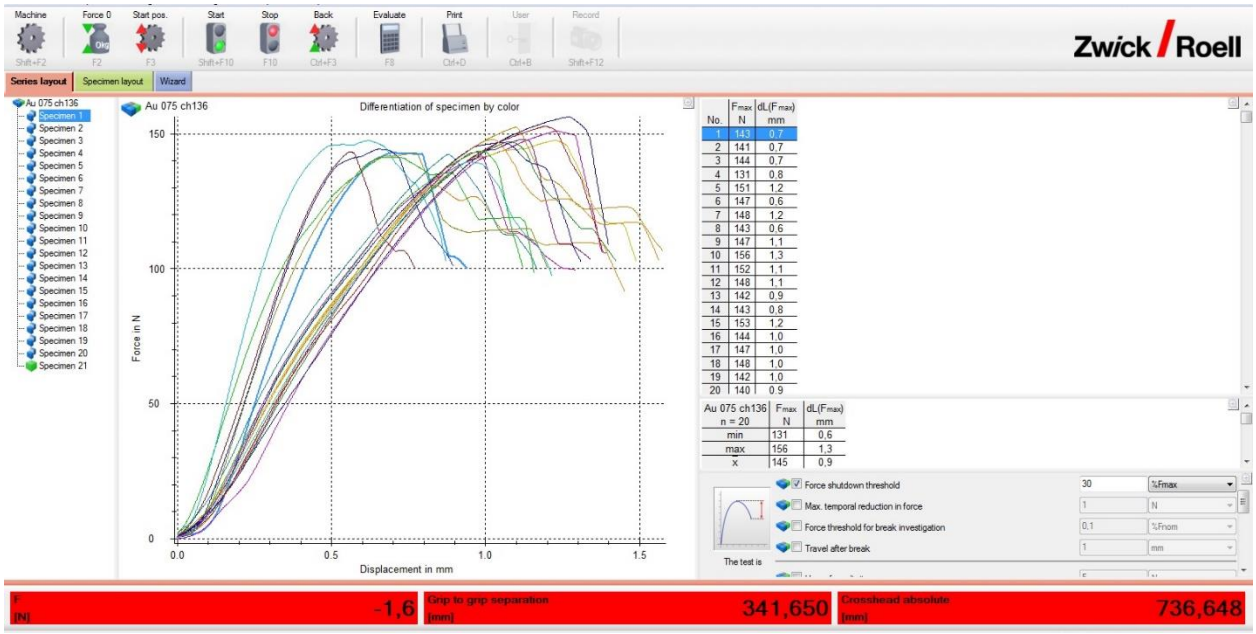
Dijagram sila-produljenje za 0,50 mm² žicu, 1,35 mm visina steznog spoja, prevlaka zlatna



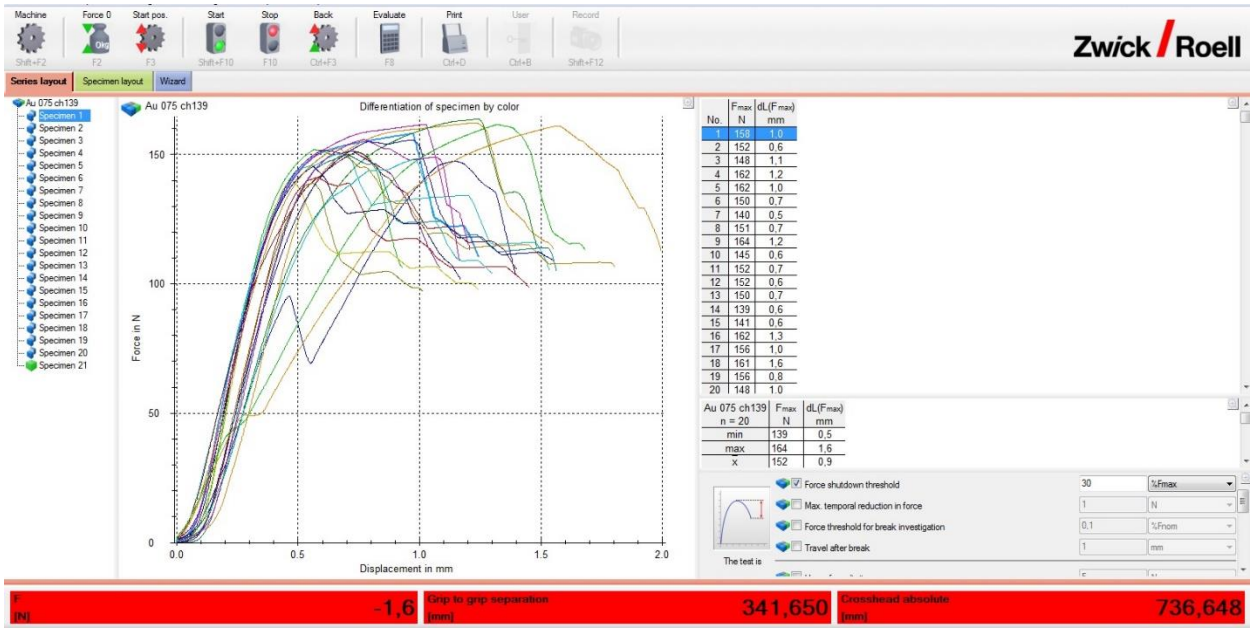
Dijagram sila-produljenje za 0,50 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja, prevlaka zlatna



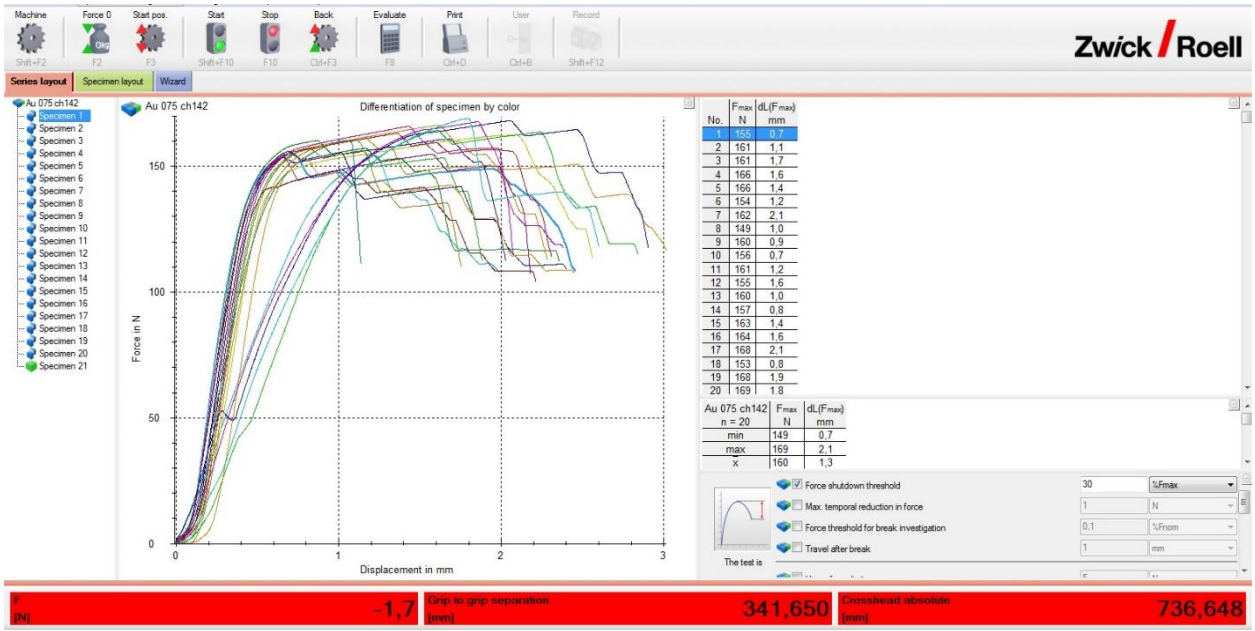
Dijagram sila-produljenje za 0,50 mm² žicu, 1,43 mm visina steznog spoja, prevlaka zlatna



Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,35 mm visina steznog spoja, prevlaka zlatna



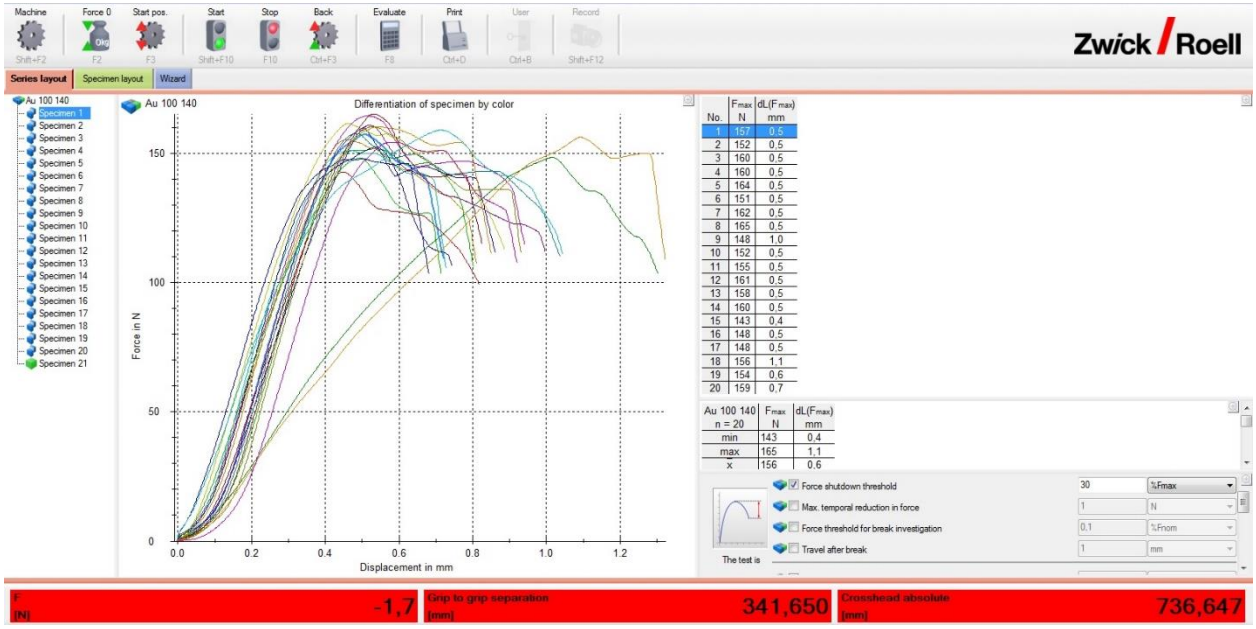
Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja, prevlaka zlatna



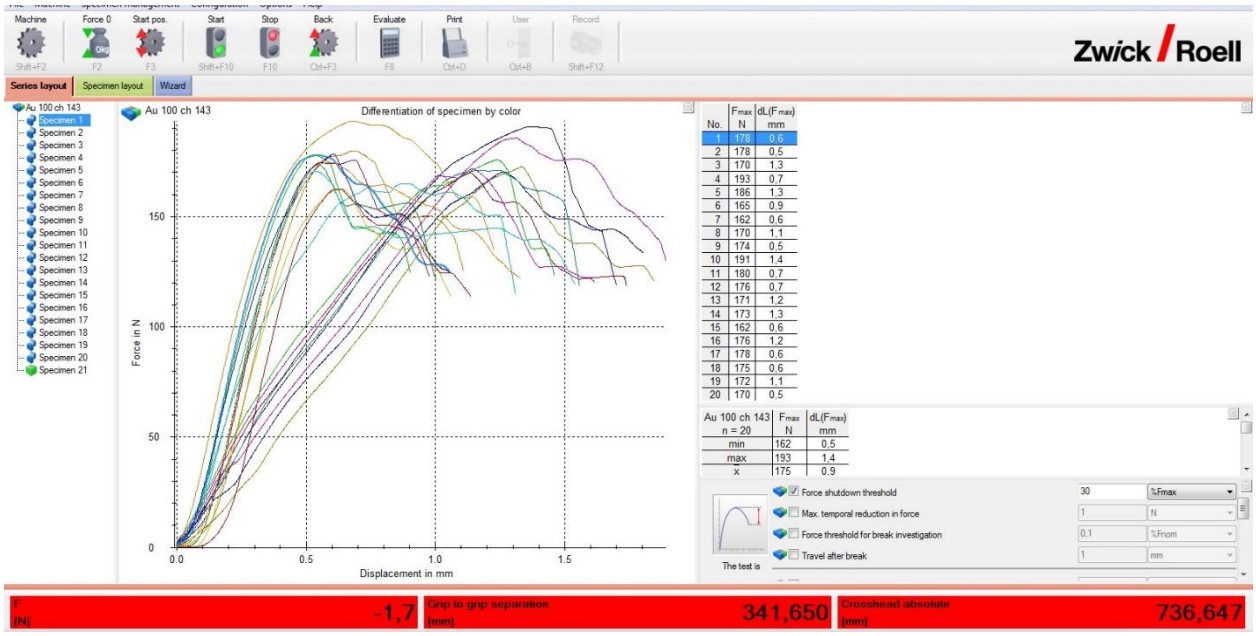
Dijagram sila-produljenje za 0,75 mm² žicu, 1,43 mm visina steznog spoja, prevlaka zlatna



Dijagram sila-produljenje za 1,00 mm² žicu, 1,35 mm visina steznog spoja, prevlaka zlatna



Dijagram sila-produljenje za 1,00 mm² žicu, 1,39 mm visina steznog spoja, prevlaka zlatna



Dijagram sila-produljenje za 1,00 mm² žicu, 1,43 mm visina steznog spoja, prevlaka zlatna