

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Šavora, U. 2013. Tirnica, ključni element zgornjega ustroja železniških prog. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Zgonc, B., somentorica Šemrov, D.): 114 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Šavora, U. 2013. Tirnica, ključni element zgornjega ustroja železniških prog. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Zgonc, B., co-supervisor Šemrov, D.): 114 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
PROMETNA SMER

Kandidat:

UROŠ ŠAVORA

**TIRNICA, KLJUČNI ELEMENT ZGORNJEGA
USTROJA ŽELEZNIŠKIH PROG**

Diplomska naloga št.: 3308/PS

**RAIL, KEY ELEMENT IN THE RAILWAY
SUPERSTRUCTURE**

Graduation thesis No.: 3308/PS

Mentor:

prof. dr. Bogdan Zgonc

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. Darja Šemrov

Član komisije:

izr. prof. dr. Jana Šelih

Ljubljana, 31. 05. 2013

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **UROŠ ŠAVORA** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom
»Tirnica, ključni element zgornjega ustroja železniških prog«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 21.3.2013

Uroš Šavora

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	625.14(043.2)
Avtor:	Uroš Šavora
Mentor:	prof. dr. Bogdan Zgonc, univ. dipl. inž. grad.
Somentorica:	asist. Darja Šemrov, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Tirnica, ključni element zgornjega ustroja železniških prog
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	114 str., 12 pregl., 93 sl., 9 graf., 36 en., 3 pril.
Ključne besede:	tirnica, napetosti v tirnici, napake v tirnicah, obraba tirnic, brušenje tirnic, mazalni sistemi, varjenje tirnic, neprekinjeno zavarjeni tir

Izvleček

Tirnica je pomemben in najbolj obremenjen element v zgornjem ustroju železniških prog, saj je hkrati vozna površina, ki opravlja funkcijo vodenja vozil, ter nosilec, ki neposredno prevzema obtežbo vozil in jo prenaša na tirno gredo in spodnji ustroj. V prvem delu diplomske naloge bom opisal karakteristike tirnic ter predstavil teoretične osnove v zvezi z napetostmi, ki so posledica prometnih obremenitev, temperaturnih sprememb in proizvodnih postopkov

Pri gibanju tirnih vozil prihaja v dotikalnem območju med kolesom in tirnico do velikih kontaktnih napetosti. Zaradi tega se na vozni površini tirnice pogosto pojavljajo poškodbe. Predvsem v krivinah z manjšimi polmeri, kjer so dinamični učinki vozila na tirnico največji, prihaja do obrabljanja tirnic.

V ta namen bom predstavil najbolj pogoste površinske napake in definiral obrabo tirnic in predstavil aktualne rešitve z uporabo različnih tehnik brušenja in mazanja tirnic.

V zadnjih nekaj desetletjih se dosledno vgrajuje le še tako imenovani neprekinjeno zavarjeni tir. V drugem poglavju bom opisal postopke in predstavil pogoje za gradnjo in varjenje tirnic v neprekinjeno zavarjeni tir, v skladu z upoštevanjem Pravilnika o zgornjem ustroju železniških prog, objavljenim v Uradnem listu RS št. 92/2010. Na področju varjenja tirnic bo poseben poudarek na alumotermijskem postopku, ki spada med najbolj uveljavljene postopke za varjenje tirnic na terenu.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	625.14(043.2)
Author:	Uroš Šavora
Supervisor:	prof. Bogdan Zgonc, Ph.D.
Co-supervisor:	assist. Darja Šemrov, B.Sc.
Title:	Rail, key element in the railway superstructure
Document type:	Graduation thesis – University studies
Scope and tools:	114 p., 12 tab., 93 fig., 9. graph., 36 eq., 3 ann
Keywords:	rail, rail stresses, rail defects, rail wear, rail grinding, lubrication systems, aluminothermic welding, continuous welded track

Abstract

A rail is an important and the most heavily laden element in the railway superstructure, because it functions as both the running surface used for vehicle guidance and the beam directly transmitting the load of the vehicles to the ballast bed and the railway substructure. The first part of the thesis describes the characteristics of rails and provides a theoretical background relating to rail stresses resulting from traffic load, temperature change and production procedures.

When rail vehicles move, enormous contact stresses are produced in the contact zone between the wheel and the rail, which often causes damage to the running surface. Curves with smaller diameters cause particular wear of the rails because of the strongest dynamic effects of the vehicle on the rail. The thesis thus presents the most common surface defects, defines rail wear and outlines currently available techniques of rail grinding and lubrication.

In the last few decades, only continuous welded tracks have been consistently installed. To this end, the second chapter describes the procedures and conditions for the construction and welding of rails into continuous welded tracks as provided for in the Rules on railway line superstructure published in the Official Gazette of the Republic of Slovenia, No. 92/2010. As for rail welding, special emphasis is given to aluminothermic welding which is one of the most established procedures for rail welding on the ground.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Bogdanu Zgoncu za mentorstvo in nasvete pri izdelavi te diplomske naloge. Posebna zahvala gre tudi somentorici asist. Darji Šemrov za vso pomoč, koristne nasvete in usmerjanja v času nastajanja diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi zaposlenim v Železniškem gradbenem podjetju Ljubljana za pomoč in gradivo.

Posebna zahvala gre vsem članom moje družine in Ivani, za vso potrpežljivost, moralno podporo in spodbudo v času študija.

Na koncu naj se še zahvalim vsem prijateljem in sošolcem, zaradi katerih bodo študijska leta ostala nepozabna.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Splošno	1
1.2	Namen.....	2
1.3	Cilji	2
2	TIRNICE	4
2.1	Kratek zgodovinski pregled tirnic	4
2.2	Proizvodnja tirnic	7
2.3	Kakovost tirnic	10
2.4	Kemijska struktura tirnic	13
2.5	Označevanje tirnic	16
2.6	Dolžina tirnic	18
2.6.1	Dolžina tirnic v proizvodnji.....	18
2.6.2	Dolžina tirnic v tiru.....	19
2.7	Sile in napetosti v tirnicah	19
2.7.1	Upogibne napetosti	20
2.7.2	Notranje zaostale napetosti	27
2.7.3	Napetosti v stiku med kolesom in tirnico	28
2.7.4	Tangencialne napetosti v glavi tirnice	29
2.7.5	Napetosti zaradi temperaturnih sprememb	31
2.8	Napake v tirnicah.....	32
2.8.1	Rebričenje tirnic	33
2.8.2	Kratki valovi	35
2.8.3	Dolgi valovi	36
2.8.1	Luščenje tirnic	36
2.8.2	Drobne površinske razpoke	37
2.9	Obraba tirnic	39
2.10	Kontrola stanja tirnic v obratovanju	45
2.10.1	Meritve valovitosti in obrabe prečnega profila tirnic	45
2.10.2	Ultrazvočni pregled tirnic	46
2.11	Brušenje tirnic.....	47
2.11.1	Zgodovina brušenja	48
2.11.2	Cilji brušenja tirnic	49

2.11.3	Posledice valovitosti in obrabe.....	50
2.11.4	Strategije brušenja.....	51
2.11.4.1	Brušenje novih tirnic.....	52
2.11.4.2	Ciklično brušenje.....	52
2.11.4.3	Preventivno brušenje.....	52
2.11.4.4	Brušenje posebnih profilov.....	53
2.11.5	Brušenje z brusilno garnituro SPENO.....	55
2.11.6	Visokohitrostno brušenje »HSG«.....	57
2.12	Mazalne naprave.....	59
2.12.1	Sistemi za mazanje tirnic.....	61
2.12.1.1	Mehanske mazalne naprave.....	61
2.12.1.2	Moderne mazalne naprave.....	62
2.12.2	Vgrajevanje mazalnih naprav.....	65
3	VARJENJE TIRNIC IN NEPREKINJENO ZAVARJENI TIR.....	66
3.1	Zgodovina alumotermijskega varjena.....	69
3.2	Alumotermijski proces.....	71
3.2.1	Tehnološki postopki alumotermijskega varjenja.....	72
3.2.2	Termitne zmesi (varilne porcije).....	74
3.3	Faze izvedbe alumotermijskega varjenja s hitrim predgrevanjem na terenu.....	76
3.4	Varjenje tirnic v neprekinjeno zavarjeni tir.....	83
3.4.1	Napetosti v neprekinjeno zavarjenem tiru zaradi temperaturnih sprememb.....	83
3.4.2	Pogoji za gradnjo neprekinjeno zavarjenega tira.....	88
3.4.3	Varjenje tirnic v odseke.....	89
3.4.4	Sproščanje neprekinjeno zavarjenega tira.....	89
3.4.4.1	Naravno sproščanje pri potrebni temperaturi t_p	90
3.4.4.2	Umetno ustvarjanje razmer, ki so ekvivalentne potrebni temperaturi t_p	92
3.4.5	Končno varjenje.....	94
3.5	Zanesljivost in kontrola zvarov.....	94
3.5.1	Neporušne metode.....	94
3.5.1.1	Vizualna kontrola.....	95
3.5.1.2	Kontrola geometrije zvara.....	95
3.5.1.3	Kontrola z ultrazvokom.....	96
3.5.2	Porušne metode.....	97
3.5.2.1	Preizkus trdote zvara.....	97

3.5.2.2	Statični upogibni preizkus	100
3.5.2.3	Dinamični preizkus trdnosti.....	102
3.6	Napetosti v zvarih.....	104
3.6.1	Varilne zaostale napetosti	104
3.7	Napake v alumotermijskih zvarih.....	106
4	ZAKLJUČEK.....	110
VIRI.....		112

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Oznake jekla za izdelavo tirnic	10
Preglednica 2: Kemična struktura tirnic v trdnem stanju	14
Preglednica 3: Vrste valjanih oznak za posamezne vrste jekel	17
Preglednica 4: Oznake proizvodnih postopkov tirnic	17
Preglednica 5: Dopustne upogibne napetosti v tirnici	26
Preglednica 6: Dovoljena obraba tirnic	44
Preglednica 7: Vpliv obrabe na jakost hrupa.....	50
Preglednica 8: Tolerančna območja pri brušenju tirnic.....	57
Preglednica 9: Oznake porcij glede na posamezne vrste tirničnega jekla.....	75
Preglednica 10: Tolerančna območja površinske trdote AT-zvarov	99
Preglednica 11: Minimalne porušne upogibne sile tirnic različnih oblik.....	101
Preglednica 12: Minimalni dovoljeni povesi pri različnih kakovostnih razredih tirnic	101

KAZALO SLIK

Slika 1: Reynoldsova tirnica iz leta 1767	5
Slika 2: Tirnica iz konca 18. stoletja z vmesno razširitvijo.....	5
Slika 3: Dvoglava tirnica v žlebastem ležišču	6
Slika 4: Prečni prerez Vignolove tirnice.....	6
Slika 5: Bessemerjev in Thomasov postopek.....	7
Slika 6: Shema Siemens – Martinove peči	8
Slika 7: Elektro obločna peč.....	9
Slika 8: Shematski prikaz BOS postopka v LD- konverterju	9
Slika 9: Ravnanje tirnic	10
Slika 10: Termična obdelava glave tirnice	12
Slika 11: Označevanje tirnice	18
Slika 12: Vlak Robel 40.61-Silad za prevoz tirnic dolžine do 120 m.	18
Slika 13: Sile, ki delujejo na tirnico	20
Slika 14: Shema namišljenega vzdolžnega praga.....	20
Slika 15: Sile in momenti v prečnem prerezu tirnice	22
Slika 16: Vplivnica za upogibni moment in vplivnica za upogib tirnice.....	24
Slika 17: Vplivnica za upogibni moment pri skupini sil	24
Slika 18: Zaostale napetosti v novih tirnicah in napetosti v tirnicah zaradi prometne obremenitve	27
Slika 19: Kontaktna površina med kolesom in tirnico.....	28
Slika 20: Sile na mestu kontakta kolesa in tirnice in porazdelitev kontaktnih napetosti	28
Slika 21: Distribucija kontaktnih pritiskov na stiku med kolesom in tirnico	29
Slika 22 : Napetosti v polprostoru glave tirnice	30
Slika 23: Napetosti, ki delujejo v tirnici	32
Slika 24: Prikaz rebričenja tirnic	34
Slika 25: Kratki valovi.....	35
Slika 26 : Dolgi valovi.....	36
Slika 27: Luščenje tirnic	37
Slika 28: Drobne površinski razpoke (»Head Checks«) na robu vozne površine tirnične glave.....	37
Slika 29: Lega zarez na voznem robu zunanje tirnice	38
Slika 30: »Head Check« napake na robu vozne površine in prečni zlom v glavi tirnice	39
Slika 31: Odvisnost polmera kontaktne ploskve od kota naleta α	40
Slika 32: Debelina obrabnega sloja na kolesu lokomotive in tirnice UIC 65.....	40
Slika 33: Obraba notranje in zunanje tirnice v krivini.....	41
Slika 34: Območje največje obrabe v krivini	41
Slika 35: Razmerje obrab tirnic različnih kvalitet v krivini s polmerom 300 m	42
Slika 36: Višinska in bočna obraba tirnice	43
Slika 37: Naprava za ročno merjenje obrabe tirnice.....	44
Slika 38: Merilni vlak SPENO SM 775.....	45
Slika 39: Diagram meritev merilnega vlaka Speno SM 775 in karakteristični obrabni profili tirnice ..	46
Slika 40: Ultrazvočni merilni vlak UST 96	46
Slika 41: Normalna in kotna ultrazvočna glava.....	47
Slika 42: Standardni profil (levo), asimetrični profil proti obrabi (desno).....	54
Slika 43: Brusilni vlak Speno RR24M14 med procesom brušenja tirnic	55
Slika 44: Diagram meritev med procesom brušenja tirnic	56

Slika 45: Ultrazvočna naprava na brusilnem vlaku (levo), prikaz meritev (desno)	56
Slika 46: Brusilni vlak podjetja Vossloh za visokohitrostno brušenje	57
Slika 47: Lega brusnih kamnov	58
Slika 48: Sile, s katerimi kolo vozila deluje na tirnico v krivini	59
Slika 49: Območje nanosa maziva	60
Slika 50: Primer starejše mazalne naprave	61
Slika 51: CL-E1 mazalna naprava na Slovaškem	62
Slika 52: CL-E1 dozirno polje na progi Celje-Maribor z vidnimi dozirnimi vrtinami	63
Slika 53: Tirnica z dozirno izvrtino	64
Slika 54: Dimenzije naprave CL-E1	65
Slika 55: Elektroobločni postopek varjenja tirnic	67
Slika 56: Naprava za elektroporovno varjenje tirnic	68
Slika 57: Naprava za mobilno elektroporovno varjenje	68
Slika 58: AT-varjenje v začetku 20. stoletja	70
Slika 59: Shematični prikaz AT-postopka varjenja brez žmule »SoW«	73
Slika 60: Shematični prikaz AT-postopka varjenja brez predgrevanja »SoV«	73
Slika 61: Shematični prikaz AT-postopka varjenja z hitrim predgrevanjem »SkV«	73
Slika 62: Varilni lonci za enkratno uporabo (SUC)	74
Slika 63: Uporaba lesenih zagozd za uravnavanje stika	77
Slika 64: Priprava varilne reže	77
Slika 65: Vodoravna uravnava stika	78
Slika 66: Uravnava notranjega robu tirnice	78
Slika 67: Kontrola nagiba tirnice	79
Slika 68: Nameščanje kalupa na zvarno rego	79
Slika 69: Namestitev gorilnika za predgrevanje	80
Slika 70: Namestitev varilnega lonca	80
Slika 71: Potek AT-reakcije	81
Slika 72: Obrezovanje zvara	81
Slika 73: Dokončno brušenje zvara	82
Slika 74: Končni izgled zvara	82
Slika 75: Dilatacije in napetosti zaradi temperaturnih sprememb v NZT	83
Slika 76: Diagram mejnih napetosti in mejnih temperatur	85
Slika 77: Merjenje temperature v tirnici	86
Slika 78: Valjčki za sproščanju tirnic v krivini (levo) in v premi (desno)	91
Slika 79: Udarjanje tirnice z lesenimi bati	91
Slika 80: Naprava za segrevanje tirnic	92
Slika 81: Hidraulični tenzor in pritrdjevanje tirnice v območju tenzorja	93
Slika 82: Kontrola geometrije zvara	96
Slika 83: Pozicija ultrazvočne sonde za testiranje zvara v coni glave tirnice (levo) in v coni vratu ter noge tirnice (desno) v skladu z evropskimi standardi	96
Slika 84: Ročna ultrazvočna naprava s 45° kotno glavo	97
Slika 85: Merjenje trdote po Vickersu	98
Slika 86: Pozicija merjenja trdote po Brinellu	99
Slika 87: Shema statičnega upogibnega preizkusa zvara	100
Slika 88: Shema dinamičnega preizkusa trdnosti	102
Slika 89: Varilne zaostale napetosti vzdolž tirnice v okolici AT-zvara	105

Slika 90: Najpogostejše napake v AT-zvarih	106
Slika 91 : Prečni zlom v AT-zvaru, ki izvira iz spodnjega dela zvara (noge zvara).....	108
Slika 92: Horizontalni zlom, ki izvira iz srednjega dela (vratu) AT-zvara.....	109

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Izbor kakovosti tirnic v odvisnosti od količine prometa in polmera krožnega loka	13
Graf 2: Napredovanje globin valov	35
Graf 3: Vpliv preventivnega brušenja na rast in razvoj napak na vozni površini tirnice	53
Graf 4: Reduciranje hrupa v krivini z sistemom CL-E1	63
Graf 5: Distribucija temperature med AT-postopkom	72
Graf 6: Vzdolžna distribucija trdote AT-zvara.....	100
Graf 7: Rezultat statičnega upogibnega preizkusa	102
Graf 8: Wohlerjeva krivulja	103
Graf 9: Poroznost in dinamična trdnost.....	107

SEZNAM KRATIC

AT	alumotermijsko varjenje
NZT	neprekinjeno zavarjeni tir
SŽ	Slovenske železnice
HSH	Head Special Hardened (tirnice s povečano trdoto glave)
UIC	International Union of Railways (Mednarodna železniška zveza)
RCF	Rolling Contact Fatigue (napake, ki so posledica kontaktnega utrujanja)
HSG	High Speed Grinding (visokohitrostno brušenje)
CHFC	Composite Heavy Fluid Compound (težko fluidne kompozitne zmesi)
SUC	Single Use Crucible (varilni lonci za enkratno uporabo)
HAZ	Heat Affected Zone (toplotno vplivna cona)

1 UVOD

1.1 Splošno

Tirnica je pomemben element zgornjega ustroja železniških prog, ki poleg funkcije vodenja, neposredno prevzema obtežbo tirnih vozil in jo prenaša na pragove, posredno na tirno gredo in spodnji ustroj. Zaradi tega je tirnica najbolj obremenjen element zgornjega ustroja. Da bi bila tirnica sposobna opravljati navedene funkcije, mora imeti ustrezno obliko, prečni prerez in mehanske lastnosti, ter mora biti kvalitetno izdelana. Skozi stoletja se je oblika tirnic, dolžina tirnic in trdota materiala iz katerega je izdelana spreminjala, vendar pa je njena osnovna naloga vedno ostala enaka.

V današnjem času so tirnice izpostavljene visokim osnim obremenitvam tovornih vlakov in vse višjim hitrostim potniških vlakov, ki v današnjem času dosegajo tudi 350 km/h. Zaradi takšnih obremenitev in temperaturnih sprememb ter posledic proizvodnih procesov, se v notranjosti tirnic generirajo napetosti. Razumevanje upogibnih napetosti in napetosti v glavi tirnice, ki so posledica prometnih obremenitev je osnova in temelj za določitev dopustne obremenitve železniške proge. Napetosti in sile, ki so posledica temperaturnih sprememb, predstavljajo potencialno nevarnost za stabilnost tira. Njihovo razumevanje je osnova za gradnjo neprekinjeno zavarjenega tira, ki predstavlja naj sodobnejšo konstrukcijo zgornjega ustroja proge.

Pri gibanju tirnih vozil prihaja do velikih kontaktnih napetosti, ki nastajajo v dotikalnem območju med kolesom in tirnico. Zaradi tega prihaja na vozni površini pogosto do nastanka poškodb. Pri sodobnih pogojih uporabe tirnic predstavljajo pereč problem poškodbe, ki so posledica tako imenovanega kotalnega kontaktnega utrujanja materiala na mestih, kjer so dinamične obremenitve na tirnico največje. Takšne poškodbe so izredno nevarne in lahko vodijo do popolnega zloma, poleg tega pa njihovo hitro napredovanje in širjenje povzroča visoke stroške vzdrževanja. Predvsem v krivinah z manjšimi polmeri so sile, s katerimi kolo tirnega vozila deluje na tirnico izredno velike. Posledica tega je obraba tirnic pri čemer prihaja do odvajanja materiala z vozne površine in posledično do zmanjševanja prečnega prereza.

Pomembno vlogo k uvedbi neprekinjeno zavarjenega tira, je prispeval tudi razvoj varilni postopkov na področju varjenja in tirnic, med katerimi je alumotermisjski postopek varjenja najbolj uveljavljen in prevladujoč tako v Sloveniji, kot tudi po svetu. Da bi bil takšen tir sposoben kljubovati notranjim napetostim, morajo biti pri gradnji dosledno upoštevani vsi predpisi. Gradnja neprekinjeno

zavarjenega tira je kompleksen proces, ki je sestavljen iz številnih faz. Tudi kvaliteta zvarov je izredno pomembna, zato v ta namen obstaja vrsta preiskav, ki jih je potrebno izvajati v skladu s predpisi in standardi.

1.2 Namen

V prvem poglavju je namen diplomske naloge predstaviti karakteristike tirnic v zgornjem ustroju železniške proge, definirati in predstaviti teoretična ozadja v zvezi z silami in napetostmi, ki se pojavljajo v tirnici, opisati in definirati vzroke za obrabo in napake, ki se pojavljajo na vozni površini tirnice, ter opisati in predstaviti novosti na področju brušenja in mazanja tirnic.

V drugem poglavju je namen predstaviti postopke in pogoje za gradnjo in varjenje tirnic v neprekinjeno zavarjeni tir, v skladu z veljavnimi predpisi in standardi, ki to področje pokrivajo, ter podrobneje opisati postopke varjenja tirnic s poudarkom na alomotermijskem postopku, ki je v Sloveniji in drugod po svetu najbolj uveljavljen postopek za varjenje tirnic na terenu.

Z vsebino diplomske naloge želim prikazati vlogo in pomen tirnice v zgornjem ustroju železniške proge.

1.3 Cilji

V začetnem poglavju diplomske naloge, se bom podrobneje posvetil tirnicam in njenim karakteristikam. Opisal bom zgodovino tirnic in predstavil bistvene spremembe, ki so se tekom razvoja tirnic postopoma uvajale, kar je pripomoglo k temu, da poznamo danes več tipov tirnic, ki se med seboj ločijo po dimenzijah in obliki prečnega prereza. Nato bom predstavil postopek proizvodnje tirnic, kakovost, kemijsko strukturo in dolžine tirnic. V zvezi s tirnicami se bom skliceval na trenutno veljavne evropske standarde in predpise.

Posebno poglavje bom namenil napetostim v tirnici, kjer bom predstavil teoretične osnove in enačbe za določitev upogibnih in tangencialnih napetosti. Poleg tega bom obravnaval in predstavil tudi enačbe za določitev napetosti, ki so posledica temperaturnih sprememb in določil okvirne vrednosti rezidualnih oziroma tako imenovanih zaostalnih napetosti, ki prispevajo pomemben delež k skupni obremenitvi proge.

Nadalje se bom osredotočil na najbolj pogoste poškodbe, ki se pojavljajo na vozni površini tirnice in pojasnil razloge za njihov nastanek, ter opisal postopek brušenja tirnic, ki je učinkovit način za odpravo teh. Brušenja tirnic se je do danes dodobra razvilo in moderniziralo. V ta namen bom predstavil najsodobnejše tehnologije, novosti, strategije brušenja in tako imenovano brušenje posebnih profilov, ki dobiva danes vedno večji pomen.

V diplomski nalogi želim podrobneje definirati problem obrabe in predstaviti ukrepe za njeno zmanjševanje oziroma preprečevanje s pomočjo vgradnje najsodobnejših mazalnih sistemov. Eden takšnih sistemov je sodobna tirna mazalka CL-E1, ki se uspešno vgrajuje na našem in tujem železniškem omrežju in katere delovanje bom podrobneje opisal.

V zadnjem poglavju diplomske naloge se bom osredotočil na varjenje tirnic in gradnjo neprekinjeno zavarjenega tira, ki se v zadnjih desetletjih dosledno izvaja. Alumotermijski postopek je danes osnova za varjenje tirnic. V ta namen bom podrobneje predstavil princip alumotermije, tehnološke postopke, faze izvedbe varjenja na terenu in novosti na tem področju. Pri tem želim poudariti bistvene prednosti postopka in opozoriti na pomembne segmente, ki jih je potrebno pri procesu upoštevati zaradi zagotovitve ustrezne kvalitete zvara.

Nazadnje bom podrobneje definiral gradnjo neprekinjeno zavarjenega tira, ter predstavil pravila in pogoje za varjenje tirnic v odseke, sproščanje tira in končno varjenje, pri čemer se bom skliceval na Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010). V sklopu izvajanja kontrole zvarov, se bom pri opisu preiskav skliceval na veljavne evropske standarde.

2 TIRNICE

Tirnica je glavni element zgornjega ustroja železniške proge in je hkrati vozna površina, nosilec s konstantnim prerezom in vodilni element, ki opravlja nalogo prevzema vertikalnih (kolesnih) in horizontalnih sil. Definirana je s profilom, prečnim prerezom, ter z geometrijskimi karakteristikami in mora biti izdelana iz kvalitetnega materiala (Milojković, 1986).

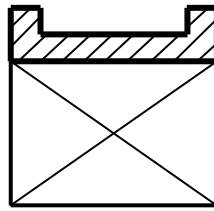
V današnjem času hitrosti potniških vlakov dosegajo 350 km/h, osne obremenitve tovornih vlakov pa dosegajo 25 t. Odvisno od topografije terena so tirnice vgrajene tudi v krivine s polmerom manjšim od 300 m, zato so izpostavljene zelo visokim bočnim silam, ki jih povzročajo kolesne dvojice tirnih vozil. Da bi tirnice lahko kljubovale visokim obremenitvam, morajo imeti naslednje lastnosti (Lichtberger, 2005):

- visoko obrabno odpornost,
- visoko tlačno odpornost,
- visoko odpornost na utrujanje,
- visoko natezno trdnost in trdoto,
- visoko odpornost proti krhkemu lomu,
- dobro varivost,
- visoko stopnjo čistosti,
- dobro površinsko kakovost in
- majhne zaostale napetosti po končanem proizvodnem postopku.

2.1 Kratek zgodovinski pregled tirnic

Od nastanka prvih oblik pa vse do danes so tirnice definirane kot kovinske grede, ki ležijo na prečnih nosilcih, to je pragih. V enem stoletju in pol so se tirnicam spremenile oblike, dolžine in trdote tirničnega materiala, medtem ko so osnovne funkcije, kot so vodenje in prenašanje obtežbe tirnih vozil, vedno ostajale enake.

Prve železne tirnice oziroma tako imenovane Reynoldsove tirnice, ki so služile za vodenje tirnih vozil, so se začele uporabljati že leta 1767. Tirnice, katerih oblika je prikazana na sliki 1, so nadomestile nekdanje lesene, ki so sicer služile istemu namenu, vendar so se železne izkazale za bistveno kvalitetnejše in obstojnejše.



Slika 1: Reynoldsova tirnica iz leta 1767

(Milojković, 1986, str: 19)

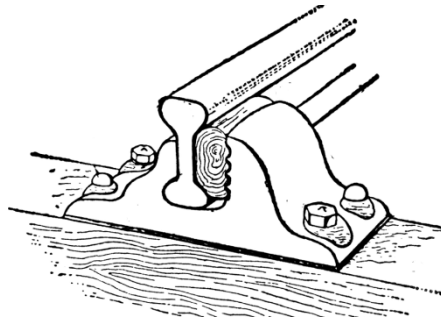
Leta 1788 je Wiliam Jessop izdelal tirnico, ki je bila sestavljena iz glave in vratu, kar je pomenilo, da so morala imeti kolesa tirnih vozil izoblikovane vence. Takšne tirnice so bile preko širše naležne površine postavljene običajno na kamnite kvadre, v srednjem delu pa je bila prisotna razširitev (»ribji trebuh«), kot je razvidno iz slike 2. Zaradi takšne oblike se je povečal vztrajnostni moment v sredini polja med podporami, kar je povečalo nosilnost tirnic, ki so bile sicer izdelane iz nizkokvalitetnega jekla z majhno trdnostjo.



Slika 2: Tirnica iz konca 18. stoletja z vmesno razširitvijo

(http://en.wikipedia.org/wiki/File:Chpr_rail.jpg (5.6.213))

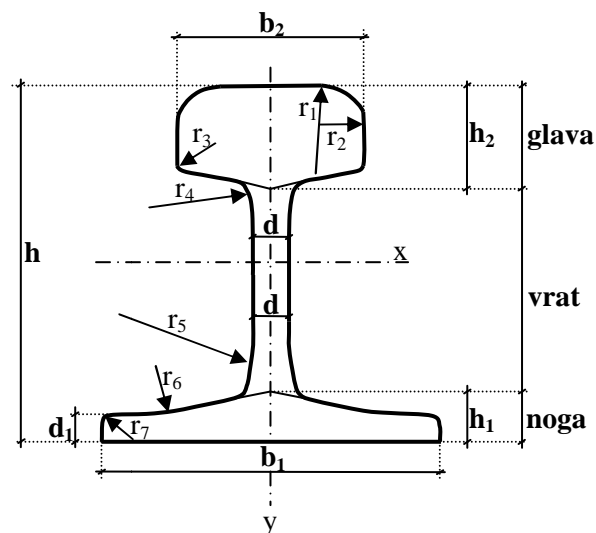
Leta 1835 je znani konstruktor George Stephenson konstruiral dvoglavo tirnico, prikazano na sliki, ki je lahko simetrična ali pa nesimetrična. Imele so dve glavi, da so se v primeru, ko je obraba tirnic dosegla določeno mejo, enostavno obrnile, kar je podaljšalo obdobje uporabe. Sčasoma se je takšen pristop opustil, saj se je izkazalo, da so se tirnice, ki so ležale v posebnih žlebovih, obrabljuje tudi na spodnji strani.



Slika 3: Dvoglava tirnica v žlebastem ležišču

(http://etc.usf.edu/clipart/26900/26979/trainrail_26979.htm (5.6.213))

V tem času je Američan Robert Livingston Stevens konstruiral tirnico v obliki »gobe«, ki se je ohranila vse do danes. Po zaslugi Charlsa Vignola se je takšna oblika tirnic uveljavila tudi v Evropi, od tu tudi ime Vignolove tirnice. Pri Vignolovih tirnicah, ki imajo gobasto obliko, razlikujemo tri osnovne dele, in sicer: glavo, vrat in nogo. Prečni presek je prikazan na spodnji sliki.



Slika 4: Prečni prerez Vignolove tirnice

(Milojković, 1986, str: 17)

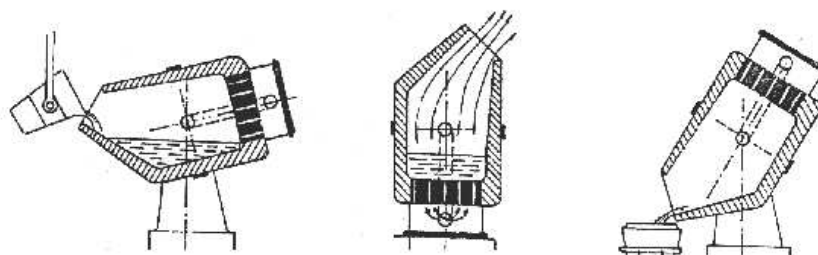
2.2 Proizvodnja tirnic

Tirnice se proizvajajo iz valjanega jekla, ki se izdeluje po naslednjih postopkih (Vidmar, 2003):

- Bessemerjevem postopku,
- Thomasovem postopku,
- Siemens-Martinovem postopku,
- elektro obločnem postopku,
- LD (Linz-Donawitz) postopku oz. postopku z vpihovanjem kisika.

Pri Bessemerjevem postopku se jeklo proizvaja v velikih pečeh imenovanih konverterji, kapacitete od 15–20 ton (Vidmar, 2003). Postopek zajema vpihovanje zraka pod velikim pritiskom v staljeno surovo železo. Zaradi tega se kisik (O) veže z ogljikom (C) ter se nato iz surovega železa izloči kot ogljikov dioksid (CO₂). Zaradi vpihovanja zraka (oksidacije) in s tem zniževanje vsebnosti ogljika, se povečuje temperatura, ki je potrebna za ohranjanje taline. Kisli Bessemerjev postopek se predvsem zaradi ekonomskih razlogov opušča in ga zamenjuje Siemens-Martinov postopek.

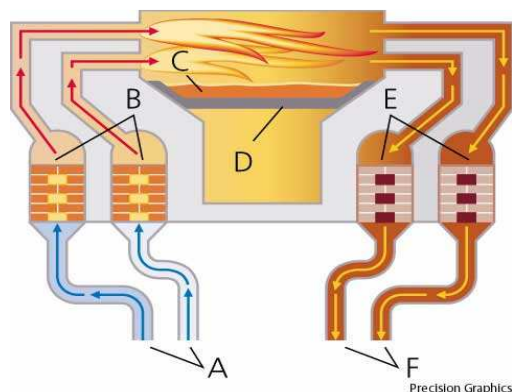
Pri Thomasovem postopku proizvodnje jekla gre za nekoliko modificiran Bessemerjev proces. Z dodajanjem apnenca ali dolomita se iz taline odstrani fosfor in žveplo. Odkritje postopka konec 19. stoletja je pomenilo novo prelomnico, saj sta postali angleška in nemška železova ruda kljub visoki vsebnosti fosforja uporabni za pridelavo kvalitetnega jekla (<http://sl.wikipedia.org/wiki/Jeklo> (5.4.2013)).



Slika 5: Bessemerjev in Thomasov postopek

(Vidmar, 2003, str. 7)

Pri Siemens-Martinovem postopku se toplota, ki je potrebna za taljenje, pridobiva s tekočim gorivom ali plinom. S pomočjo predogrevanja zraka in plina v predgeneratorskih komorah se temperatura v peči bistveno zviša (slika 6). Siemens-Martinova peč ima obliko krožnika, kapacitete 200–600 t. V talini se poleg grodlja talijo tudi ostanki starega železa (Vidmar, 2003).



Slika 6: Shema Siemens – Martinove peči (A: vhod zraka in plina, B: regeneratorske komore za predgrevanje, C: tekoče surovo železo, D: ognjišče, E: hladne regeneratorske komore, F: izhod plina in zraka)

(<http://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Open-hearth.jpg> (2.4.2013))

Kot navaja Milojkovič (1986) se jeklo nato vlija v pokončne kalupe (kokile). Temperatura vlivanja mora biti čim nižja, da se jeklo čim prej strdi, s čimer se prepreči izcejanje. Z ohlajanjem se zaradi krčenja v glavi ingota tvori lunker, ob njem je material porozen, njegova sestava pa je neenakomerna. Ta del ingota za izdelavo tirnice ni uporaben. Teža ingota je okoli 5 ton, od tega zaradi neuporabnosti materiala odpade skoraj tretjina teže. Ingote se odstrani iz kalupov v žarjenem stanju in se jih nato prestavi v peči, v katerih se temperatura počasi izenačuje na temperaturo valjanja, ki znaša 1150–1200 °C. Valjanje ingotov poteka po posebnem postopku, in sicer najprej skozi gladke valje in nato skozi profilirane valje, pri čemer tirnica dobiva svojo obliko. Različni profili tirnice imajo različno število prehodov skoz valje, na primer tirnica 49 E1 gre 19-krat skozi gladke valje in 9–11-krat skozi profilirane valje. Celoten proces valjanja traja okoli 3 minute na gladkih valjih in 4–5 minut na profiliranih valjih. Pri tem se temperatura tirnice zniža na 900 °C. Nato sledi poseben postopek ohlajanja tirnice, ki traja toliko časa, da temperatura v tirnici pade na 500 °C, sledi naravno ohlajanje na posebnih odrih. Postopek ohlajanja je izredno pomemben proces, saj lahko v notranjosti tirnice pride do pojave tako imenovanih rezidualnih (zaostalnih) napetosti, ki lahko vplivajo na skrajšanje življenjske dobe tirnice. Ko so tirnice ohlajene na primerno temperaturo, se jih odreže na ustrezno dolžino. Sledi vrtanje lukenj in piljenje vseh ostrih robov ter roba glave na čelni ploskvi, s čimer se prepreči tvorjenje finih razpok, ki lahko pripeljejo do zloma tirnice.

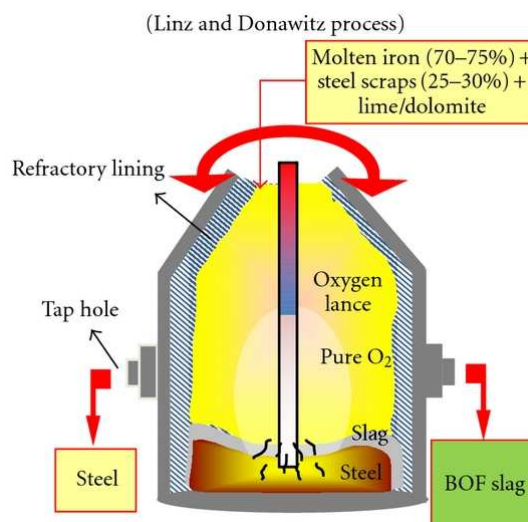
Pri elektro obločnem postopku se v elektropečeh taljenje surovin doseže s pomočjo oglenih elektrod, ki tik nad surovinami ustvarijo električni oblok. Za razliko od zgoraj omenjenih postopkov, pri elektro obločnem postopku ni potrebno dovajanje kisika, zato v talini ne nastajajo dodatni zračni mehurčki, kar omogoča izdelavo visokokakovostnih jekel. Glavna pomanjkljivost električnih peči je velika količina porabljene energije (<http://sl.wikipedia.org/wiki/Jeklo> (4.4.2013)).



Slika 7: Elektro obločna peč

(<http://www.delo.si/druzba/kult/mati-fabrika-je-dala-kruh-tisocem-delavcev.html>(1.4.2013))

V novejšem času, se jeklo proizvaja s tako imenovanim osnovnim oksidacijskim postopkom (BOS angl. Basic oxygen steelmaking). Postopek je razvilo in prvič predstavilo avstrijsko podjetje Voestalpine AG leta 1952 (<http://sl.wikipedia.org/wiki/Jeklo> (4.4.2013)). Z vpihovanjem čistega kisika na surovo železo v LD-konverterju (po predhodni kemični obdelavi-defosfatizaciji in razžvepljanju) se temperatura dvigne do 1700 °C, raven ogljika pa se zniža.



Slika 8: Shematski prikaz BOS postopka v LD-konverterju

(<http://www.hindawi.com/journals/ace/2011/463638/fig2/> (3.4.2013))

Po končani oksidaciji v LD-konverterju, se jeklu dodajo legirni elementi. Tekoče jeklo se nato vlije v kalupe, v katerih počaka toliko časa, dokler se ne ohladi na temperaturo, ki je primerna za valjanje. Proces valjanja tirničnega jekla obsega približno 20 ciklov in se izvaja pri temperaturi okoli 1250 °C. Med procesom ohlajanja se tirnice zvijajo, zato jih je potrebno, pri temperaturi 50 °C, s pomočjo

valjev ponovno zravnati, pri čemer v njihovi notranjosti nastajajo napetosti (slika 9). Bistvena prednost opisanega postopka je uporaba čistega kisika namesto zraka, ki skupaj z modernim prečiščevalnim procesom zagotavlja dobro zrnastost in dobro varljiv material z enakomerno trdnostjo in žilavostjo (Lichtberger, 2005).



Slika 9: Ravnanje tirnic

(<http://www.lucchini.com/pdf/rails-products.pdf> (6.4.2004))

2.3 Kakovost tirnic

Kakovost tirnic je v skladu s standardom (EN 13674-1:2003) določena s trdoto vozne površine tirnice. Glede na omenjeni standard se tirnice delijo v sedem kakovostnih razredov.

Preglednica 1: Oznake jekla za izdelavo tirnic v skladu s standardom (EN 13674-1:2003)

Vrsta jekla	Območje trdote (HBW)	Opis jekla	Min. natezna trdnost [N/mm ²]
R200	200 – 240	Ogljik-manganovo (C-Mn)	680
R220	220 – 260	Ogljik-manganovo (C-Mn)	770
R260	260 – 300	Ogljik-manganovo (C-Mn)	880
R260Mn	260 – 300	Ogljik-manganovo (C-Mn)	880
R320Cr	320 – 360	Legirano jeklo (1 % Cr)	1080
R350HT	350 – 390	Ogljik-manganovo (C-Mn), toplotno obdelano	1175
R350LHT	350 – 390	Malo legirano, toplotno obdelano	1175

Od izgradnje prve železniške proge pa vse do danes so se za tirnice vedno znova postavljale strožje zahteve. Lokomotive so postajale vse močnejše, osne obremenitve in hitrosti vlakov pa vse večje. Vzporedno s tem so se povečevale tudi zahteve po vse večji natezni trdnosti tirnic. Tirnicam povečamo natezne trdnosti na tri načine in sicer (Milojković, 1986):

- s površinsko obdelavo tirnice,
- s kombiniranimi tirnicami, ki so narejene iz dveh materialov različnih trdnosti,
- z naravno trdimi tirnicami.

Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010) določa, da mora kakovost novih tirnic ustrezati najmanj vrsti jekla R260 z minimalno natezno trdnostjo 880 N/mm^2 . Odvisno od obsega prometa in polmerov krožnih lokov se v posamezne odseke prog vgrajujejo tudi posebno trde ali toplotno obdelane tirnice.

Skladno s Pravilnikom o zgornjem ustroju železniških prog (2010) se v Sloveniji za nove tirnice uporabljajo sledeče kvalitete tirnic. Oznake jekla v nadaljevanju so skladne s standardom (EN 13674-1:2003):

- zmerno trde tirnice (R260 in R260Mn), katerih natezna trdnost znaša minimalno 880 N/mm^2 , trdota pa od 260–300 HB,
- specialno trde tirnice (R320Cr) iz legiranega jekla, katerih natezna trdnost je višja od 1080 N/mm^2 , trdota pa 320–360 HB,
- »HSH« tirnice (R350HT), kjer je osnovni material jeklo (R260) z minimalno natezno trdnostjo 880 N/mm^2 , glava pa je toplotno obdelana in ima zato povečano trdoto, ki znaša 350–390 HB, natezna trdnost pa je večja od 1175 N/mm^2 .

Pri zmerno trdnih tirnicah z vrsto jekla R260 in R260Mn je povečana natezna trdnost posledica povečane vsebnosti ogljika in mangana. Pri tirnicah z vrsto jekla R260 je količina ogljika napram manganu izraziteje povečana, medtem ko je pri tirnicah z vrsto jekla R260Mn ravno obratno. Prednost tirnic z vrsto jekla R260 je v predvsem v tem, da je le te lažje variti, zato so bolj primerne za vgrajevanje v neprekinjeno zavarjeni tir (Milojković, 1986).

Specialno trde tirnice (R320Cr) z minimalno natezno trdnostjo 1080 N/mm^2 , imajo v primerjavi s tirnicami iz jekla vrste R260 in R260Mn večjo trdoto po celotnem prerezu tirnice, kar je posledica povečane vsebnosti kroma. Vsebnost kroma v takšnih tirnicah se giblje med 0,75–1,25 %. Zaradi večje vsebnosti kroma so takšne tirnice nekoliko slabše varive (Zaletelj, Flerin, 2006).

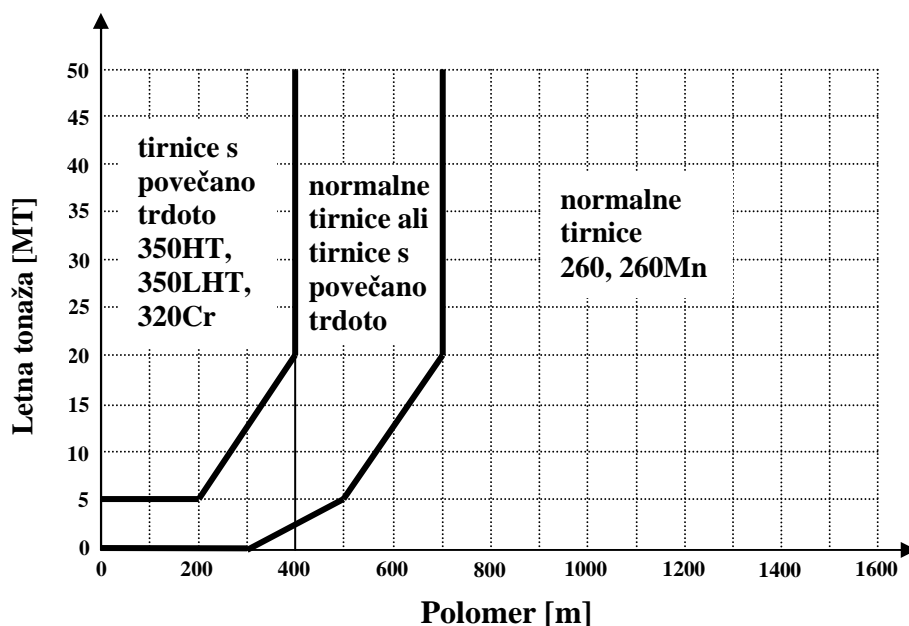
Tirnice s povečano trdoto glave, ki doseže vrednosti 340–380 HB, ali tako imenovane HSH (angl. Head Special Hardened) tirnice imajo drugačno mikrostrukturo od zmerno trdih tirnic, kar se doseže s posebnim toplotnim postopkom. Kot razlaga Lichtberger (2005), se tirnice najprej segreje na temperaturo 850–950 °C. Nato se jih s pomočjo stisnjenega zraka ali vode po predpisanem postopku ohladi na temperaturo 650–500 °C, s čimer se v glavi tirnice doseže finoperlitno strukturo, ki zagotavlja visoko trdnost in trdoto, medtem ko ostane stojina in noga tirnice mehkejša in s tem bolj žilava. V zadnji letih se v Sloveniji naročajo in vgrajujejo tirnice z vrsto jekla R350HT. Tirnic z manjšo trdoto se praviloma ne vgrajuje več.



Slika 10: Termična obdelava glave tirnice

(Marušić, 2009, str. 3)

Kodeks UIC (UIC 721 E, 2005) priporoča izbor kakovosti tirnic v odvisnosti od obsega prometa in geometrijskih karakteristik proge (velikosti polmera krivine ter vzdolžnega nagiba nivelete). Za proge z veliko prometno obremenitvijo, velikim vzdolžnim nagibom nivelete, predvsem pa v krivinah z majhnim polmerom krožnega loka, kjer se pričakuje večja obraba tirnice, se priporoča uporaba toplotno obdelanih tirnic s povečano trdoto, kar prikazuje spodnji graf.



Graf 1: Izbor kakovosti tirnic v odvisnosti od količine prometa in polmera krožnega loka v skladu s kodeksom UIC 721 E

(http://www.innotrack.net/IMG/pdf/d415-f3-railgrade_selection.pdf (12.2.2013))

2.4 Kemijska struktura tirnic

Poleg železa (Fe), ki je osnovni material, vsebuje tirnično jeklo še elemente, kot so ogljik (C), mangan (Mn), silicij (Si), fosfor (P), žveplo (S) in ostale legirne elemente, kot so krom (Cr), nikelj (Ni), vanadij (V), molibden (Mo), s katerimi se izboljšajo lastnosti jekla. Čim večji je odstotek ogljika (C) v jeklu, tem popolnejša mora biti tehnološka stran proizvodnega procesa, ker pridejo napake in pomanjkljivosti kovine tem bolj do izraza, čim večja je vsebnost ogljika. Tudi škodljivost primesi fosforja (P) in žvepla (S) je občutnejša pri jeklu, bogatem z ogljikom.

Preglednica 2: Kemična struktura tirnic v trdnem stanju (EN 13674-1:2003)

Vrsta jekla	C	Si	Mn	Cr	Al	V	P	S
R200	0,38 – 0,62	0,13 – 0,60	0,65 – 1,25	≤0,15	≤0,004	≤0,030	≤0,040	≤0,020
R220	0,50 – 0,60	0,20 – 0,60	1,00 – 1,25	≤0,15	≤0,004	≤0,030	≤0,025	≤0,020
R260	0,60 – 0,82	0,13 – 0,60	0,65 – 1,25	≤0,15	≤0,004	≤0,030	≤0,030	≤0,020
R260 Mn	0,53 – 0,77	0,13 – 0,62	1,25 – 1,75	≤0,15	≤0,004	≤0,030	≤0,030	≤0,020
R320 Cr	0,58 – 0,82	0,48 – 1,12	0,75 – 1,25	0,75 – 1,25	≤0,004	≤0,20	≤0,025	≤0,020
R350 HT	0,70 – 0,82	0,13 – 0,60	0,65 – 1,25	≤0,15	≤0,004	≤0,030	≤0,025	≤0,020
R350 LHT	0,70 – 0,82	0,13 – 0,60	0,65 – 1,25	≤0,30	≤0,004	≤0,030	≤0,025	≤0,020

Elementi ki se nahajajo v strukturi tirničnega jekla se lahko delijo na koristne elemente, to je legirne elemente, ki izboljšajo lastnosti in na škodljive elemente, to je ostanke žindre, ki slabo vplivajo na lastnosti jekla. Vplivi posameznih legirnih elementov in nečistoč na lastnosti jekla so naslednji (Kožuh, 2010).

Legirni elementi, ki izboljšajo lastnosti tirničnega jekla

- **Ogljik (C)** je nekovina, ki ima temperaturo tališča nad 4000 °C in se uporablja za povečanje trdote, meje raztezanja in natezne trdnosti ter zniževanje udarne žilavosti in raztezka. V tirničnem jeklu ga je od 0,38–0,82 %.
- **Mangan (Mn)** je težka kovina, ki ima temperaturo tališča 1221 °C. Mn veže žveplo in s tem preprečuje nastajanje razpok pri varjenju, povečuje natezno trdnost, mejo raztezanja in pri nizki vsebnosti ogljika tudi zarezno žilavost. Pri vsebnosti Mn nad 1,6 %, prihaja do prevelikega povečanja trdote, kar posledično vpliva na slabo preoblikovanje zvarjenih spojev. Pri večini vrst tirničnih jekel je vsebnost Mn manjša od 0,15%. Pri naraščanju vsebnosti tega se pri tirnicah poveča obrabna odpornost.

- **Silicij (Si)** je nekovina, ki ima temperaturo tališča $1414\text{ }^{\circ}\text{C}$ in je dezoksidant (odvzema kisik). Povečuje pozitivne učinke ogljika, trdoto in moč jekla ter pospešuje staranje. Vsebnost Si v tirnicah je med 0,13–0,60 %.
- **Krom (Cr)** je kovina, ki ima temperaturo tališča $1920\text{ }^{\circ}\text{C}$ in se jeklu dodaja za povečevanje trdnosti, trdote in žilavosti. V dvomaterialnih tirnicah je vsebnost kroma od 0,7–1,2 %. Na železniškem omrežju se na obremenjenih odsekih vgrajujejo krom-manganske tirnice z vsebnostjo kroma od 0,75–1,25% in minimalno natezno trdnostjo 1080 N/mm^2 .
- **Nikelj (Ni)** je kovina, ki ima temperaturo tališča $1453\text{ }^{\circ}\text{C}$ in se uporablja za povečevanje žilavosti, udarne trdnosti in korozijske odpornosti. V tirničnem jeklu je vsebnost Ni manjša od 0,10 %.
- **Vanadij (V)** je kovina s temperaturo tališča $2622\text{ }^{\circ}\text{C}$. V železu je topljiv in tvori karbide. Dodajanje vanadija povečuje trdoto in trdnost jekla, brez znižanja žilavosti. Maksimalna vsebnost V v tirničnem jeklu je 0,030 %.
- **Molibden (Mo)** je kovina, ki ima temperaturo tališča $2622\text{ }^{\circ}\text{C}$ in se uporablja za povečevanje trdote, ter odpornosti proti koroziji, lahko pa povzroča tudi krhkost jekla. Maksimalna vsebnost Mo v tirničnem jeklu je 0,02 %.
- **Aluminij (Al)** je kovina, ki ima temperaturo tališča $658\text{ }^{\circ}\text{C}$ in se najpogosteje uporablja kot sredstvo za dezoksidacijo (veže kisik v aluminijev oksid). Z dodatkom aluminija postaja jeklo manj občutljivo na staranje, poleg tega pa se uporablja za preprečevanje nastanka poroznosti (mehurčkov) pri pomirjanju tekočega jekla v livarnah. Maksimalna vsebnost Al v tirnicah je 0,004 %.

Nečistoče (primesi), ki slabo vplivajo na lastnosti tirničnega jekla:

- **Fosfor (P)** je nekovina s temperaturo tališča $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ in vrelišča $282\text{ }^{\circ}\text{C}$, ki prehaja preko rude v grodelj (surovo železo) in s tem v jeklo. V jeklu je prisoten kot nečistoča, zato mora biti njegov masni delež kar se da nizek, in sicer manjši od 0,25 %, pri večini vrst tirničnih jekel (razen vrste jekla R200). Fosfor povečuje krhkost jekla, pri višjih vsebnostih ogljika pa postaja krhkost še izrazitejša. Fosfor zmanjšuje tudi udarno žilavost in plastičnost jekla in povečuje dovzetnost za staranje jekla, kar pogosto vodi k temu, da na mestih, na katerih so

povečane napetosti, lahko pride do zloma. Segregacije fosforja v jeklu so nezaželjene, saj so razlog za škodljivo nehomogenost strukture.

- **Žveplo (S)** je nekovina s temperaturo tališča $118\text{ }^{\circ}\text{C}$ in vrelišča $444\text{ }^{\circ}\text{C}$, ki v glavnem prehaja preko koksa in rude v grodelj in nato v jeklo. Žveplo je glavni element, ki je odgovoren za pojav segregacije (sulfidov) v jeklu. Železov sulfid (FeS) povzroča pojav tako imenovanega rdečega in belega loma. Temperatura tališča železovega oksida namreč znaša $985\text{ }^{\circ}\text{C}$, medtem ko se vroče valjanje tirnic izvaja pri temperaturi nad $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. S taljenjem FeS prihaja do pojava rdečega loma in zmanjšanja žilavosti. Zaradi tega se jekla z višjo vsebnostjo žvepla v vročem stanju ne morejo deformirati. Zmanjšanje škodljivega učinka FeS se doseže z dodajanjem mangana in s tem ustvarjanjem sulfida MnS, ki ima znatno večjo temperaturo tališča ($1610\text{ }^{\circ}\text{C}$) od temperature, pri kateri poteka vroče valjanje jekla. Pri varjenju se pod vplivom visokih temperatur MnS prične taliti in nato pod vplivom zunanjih napetosti povzroča nastajanje lokalnih mikrorazpok. Maksimalna vsebnost S v tirničnem jeklu je $0,02\%$ žvepla.
- **Vodik (H)** ima temperaturo tališča $-262\text{ }^{\circ}\text{C}$ in vrelišča $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ in predstavlja nezaželjen (škodljiv) element v jeklu. Vodik pripada skupini elementov z najmanjšim premerom atomov, zato je hitrost difuzije vodika v železo zelo visoka. V grodelj prihaja preko zarjavelega odpadnega jekla. Vodik se izceja in ob kopičenju večje količine povzroča krhkost. Pri ohlajanju tirničnega jekla z minimalno natezno trdnostjo 880 N/mm^2 prihaja zaradi izločanja vodika iz trdne raztopine in povečanja pritiska v mikroporah v glavi tirnice do pojava napetosti, ki povzročajo nastanek majhnih razpok, iz katerih pod vplivom dinamičnih obremenitev nastanejo trajni zlomi, ki imajo školjkasto obliko (školjkasti prelom). V skladu s standardom (SIST EN 13674-1:2004) vsebnost H v tirnicah ne sme presegati $2,0 \times 10^{-5}\%$ mase.

2.5 Označevanje tirnic

Oznake na tirnici morajo biti v skladu s standardom SIST EN 13674-1:2004 uvaljane na sredino vratu vsake tirnice na medsebojni razdalji 4 m. Oznake morajo biti čitljive in v velikosti od 20-25 mm. Oznake na tirnici morajo vsebovati vsaj:

- identifikacijsko oznako valjarne,
- oznako za vrsto jekla, kot je prikazano v preglednici 3,
- zadnji dve številki leta proizvodnje.

Posebne oznake pa so lahko še: puščica, katere vrh prikazuje smer od glave proti peti ingota, številko meseca proizvodnje in simbol proizvodnega postopka izdelave jekla.

Vrste valjanih oznak za posamezne kakovosti tirničnega jekla in oznake proizvodnih postopkov so naslednje:

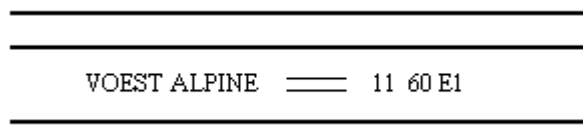
Preglednica 3: Vrste valjanih oznak za posamezne vrste jekel v skladu s standardom (SIST EN 13674-1:2004)

Vrsta jekla	Oznaka na vratu tirnice
R200	
R220	—
R260	==
R260Mn	===
R320Cr	====
R350HT	— —
R350LHT	— — == —

Preglednica 4: Oznake proizvodnih postopkov tirnic po UIC (Milojković, 1986, str: 15)

Proizvodni postopek	Oznaka na vratu tirnice
Siemens – Martinov postopek	□
Thomasov postopek	┌
elektro obločni postopek	▯▯
postopek z vpihovanjem kisika	▭▭

Primer označevanja tirnic je prikazan na Slika 11. Oznake kažejo, da je tirnica proizvedena v proizvodnji Voestalpine, izdelana iz ogljik-manganovega jekla s trdoto 260 HBW, leta 2011 in da je tipa 60 E1.



Slika 11: Označevanje tirnice

(EN 13674-1:2003)

2.6 Dolžina tirnic

2.6.1 Dolžina tirnic v proizvodnji

Dolžine tirnic v proizvodnji so omejene tako z velikostjo proizvodnega obrata kot tudi z možnostjo transporta in pretovarjanja. Za prevoz dolgih tirnic od mesta proizvodnje do gradbišča, kjer se vgrajujejo, se uporabljajo posebna vlakovna kompozicija, sestavljena iz plato vagonov. Običajne dolžine, ki se proizvajajo v obratih, so 22,5 m, 30 m, v novejšem času pa vse do 120 m (Milojković, 1986).



Slika 12: Vlak Robel 40.61-Silad za prevoz tirnic dolžine do 120 m.

(http://www.sz-zgp.si/index.php/strojni_park (5.4.2013))

2.6.2 Dolžina tirnic v tiru

Odločitev glede dolžin tirnic, ki se bodo vgrajevale v tir, je v prvi meri odvisna od vrste tira, ki se bo gradil, to je stikovani tir ali neprekinjeno zavarjeni tir.

V stikovani tir, pri katerem so tirnice na stikih povezane s spojkami, se praviloma vgrajujejo tirnice dolžin 45 m, z maksimalno dilatacijo, ki je konstruktivno omejena na 20 mm. Zaradi zagotavljanja radialnosti tirnih stikov, je potrebno v krivinah stikovanega tira, natančneje v notranji trak tira, poleg tirnic normalnih dolžin, vgrajevati tudi enkrat, dvakrat ali trikrat skrajšane tirnice, ki se izdelajo v valjarnah. Pri tem enkratna skrajšava pomeni skrajšanje dolžine za 55 mm, dvakratna za 110 mm in trikratna za 165 mm (Zgonc, 2012).

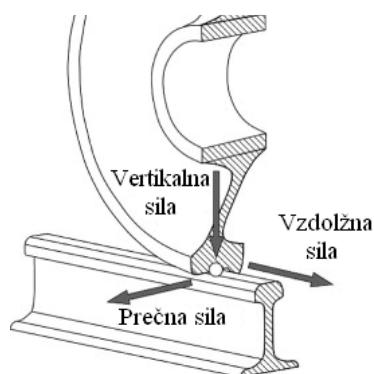
V neprekinjeno zavarjeni tir, ki je najsodobnejša oblika tira, se vgrajujejo tirnice čim večjih dolžin. V Sloveniji se v zadnjem času naročajo tirnice dolžin 120 m. Na tem mestu je potrebno upoštevati tudi možnost transporta tirnic na gradbišče in vrsto mehanizacije, ki je na razpolago za polaganje.

Prednosti daljših tirnic so predvsem naslednje (Lichtberger, 2005):

- hitrejša vgradnja na terenu,
- višja kvaliteta in trajnost vgrajenih produktov,
- večja produktivnost pri sproščanju in varjenju (manj zvarov),
- krajši nakladalni in razkladalni časi,
- boljša izkoriščenost kapacitet transportnih enot,
- manj vzdrževalnih del.

2.7 Sile in napetosti v tirnicah

Vsi elementi zgornjega ustroja so podvrženi obremenitvam, ki so posledica delovanja zunanjih in notranjih sil. Na tirnice, kot najbolj obremenjene elemente zgornjega ustroja, delujejo vertikalne kolesne sile in horizontalne sile. Pri horizontalnih silah ločimo vzdolžne (longitudinalne) sile, ki so posledica vlečnih sil in sil pri zaviranju, ter prečne (bočne) sile, ki so posledica togih osi tirnih vozil, ki izmenično nalegajo na eno in drugo tirnico. Sile so lahko statične, kar pomeni da delujejo v stanju mirovanja in dinamične, ki delujejo pri gibanju tirnega vozila in imajo velik pomen pri računu napetosti v zgornjem ustroju (Milojković, 1986).

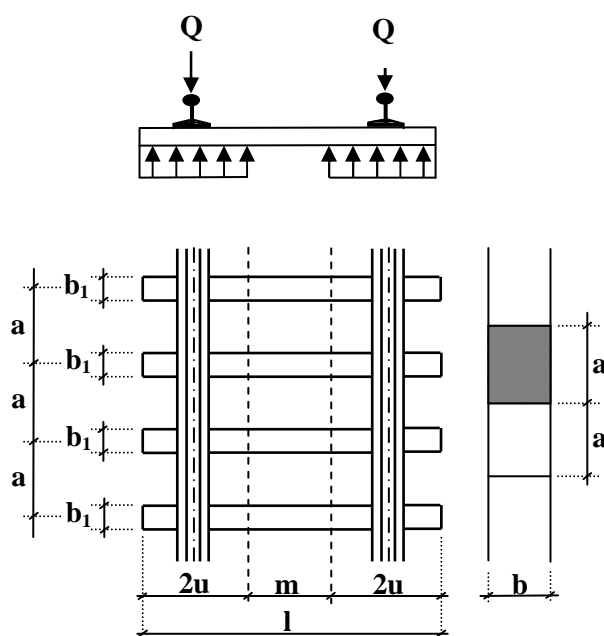


Slika 13: Sile, ki delujejo na tirnico

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794409002707> (20.4.2013))

2.7.1 Upogibne napetosti

Za izračun upogibnih napetosti obstaja veliko različnih metod, med katerimi je najbolj utemeljena in izpopolnjena metoda po Zimmermannu. Poleg upogibnih napetosti omogoča metoda tudi izračun pritiska tirnice na prag in posedka tirnice pod prometno obremenitvijo. Osnovna predpostavka Zimmermannove metode pri izračunu upogibnih napetosti je, da je tirnica vzdolžni nosilec brez teže na elastični podlagi. Ker je upogib med dvema pragoma zelo majhen (zanemarljiv) v primerjavi s celotnim upogibom tirnice, Zimmermann iz tega razloga prečne prage nadomesti s tako imenovanim namišljenim vzdolžnim pragom, na katerem leži tirnica.

Slika 14: Shema namišljenega vzdolžnega praga
(Milojković, 1986, str. 68)

Na sliki 14 pomenijo posamezne oznake naslednje:

- Q statična kolesna sila,
- u razdalja od osi tirnice do konca praga,
- $2u$ dolžina praga, za katerega se predpostavlja, da prevzema obtežbo,
- a razdalja med pragi,
- b_1 širina praga,
- b širina namišljenega vzdolžnega praga.

V nadaljevanju so prikazane enačbe, kot jih navaja Zgonc (2012). Na podlagi slike 14 lahko širino namišljenega vzdolžnega praga b izračunamo po naslednji enačbi:

$$b = \frac{2ub_1}{a} \text{ [cm]} \quad (1)$$

S pomočjo koeficienta podajnosti tira C , ki ga Zimmermann uvede v svoj izračun, izračunamo pritisk grede na vzdolžni prag p , z naslednjo enačbo:

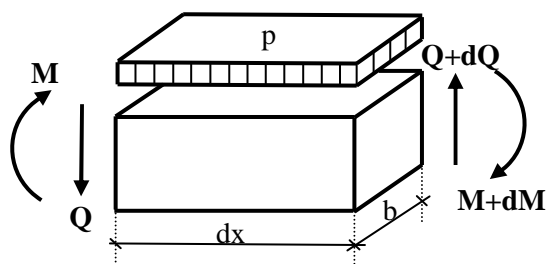
$$p = Cy \text{ [N/cm}^2\text{]}, \quad (2)$$

pri čemer je:

- p pritisk grede na vzdolžni prag [N/cm²],
- C koeficient podajnosti tira, ki pove, kolikšna mora biti sila na cm² površine praga, da se bo ta posedel za 1 cm [N/cm³],
- y posedek praga [cm].

Vrednosti koeficienta podajnosti tira C , varirajo med 20 in 600 N/cm³ in so odvisne od stanja spodnjega ustroja in grede, ter vremenskih vplivov. Najslabši podlagi pripada vrednost koeficienta podajnosti tira 20 N/cm³, zelo dobri podlagi vrednost 150 N/cm³ in nepodajni podlagi vrednosti od 300-600 N/cm³ (Zgonc 2012).

Izhodišče za nadaljnjo izpeljavo enačb je zapis ravnotežnega pogoja za del nosilca z dolžino dx . Osnovna predpostavka za zapis ravnotežnega pogoja je, da sta prečna sila Q v opazovanem prerezu dx vzdolžnega nosilca in upogibni moment M v ravnotežju z zunanjo obtežbo (slika 15).



Slika 15: Sile in momenti v prečnem prerezu tirnice

(Zgonc, Sile in napetosti v zgornjem ustroju)

Pogoj za ravnotežje sil lahko zapišemo kot sledi:

$$dQ = p b dx \rightarrow \frac{dQ}{dx} = bp = bCy \quad (3)$$

$$dM = Q dx \rightarrow \frac{dM}{dx} = Q \quad (4)$$

$$\frac{d^2M}{dx^2} = \frac{dQ}{dx} = bp = bCy \quad (5)$$

V zgornjih enačbah x pomeni oddaljenost opazovanega prereza od neke točke. Z upoštevanjem enačbe ukrivljenosti upogibne črte ter uvedbi nove spremenljivke dobimo z ustrežno matematično obdelavo enačbo za upogib oziroma posedek praga zaradi posamične kolesne sile Q :

$$y = \frac{Q}{2bCL} \cdot \eta \quad [\text{cm}] \quad (6)$$

Pri čemer je η ordinata vplivnice za upogib tirnice pod silo Q in jo izračunamo po naslednji enačbi:

$$\eta = \frac{\sin\xi + \cos\xi}{e^\xi} \quad (7)$$

V enačbi (6) je L označena konstanta zgornjega ustroja, ki predstavlja karakteristično dolžino namišljenega nosilca na elastični podlagi, in je podana z naslednjo enačbo:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} \quad [\text{cm}], \quad (8)$$

pri čemer je:

- E modul elastičnosti tirnice $2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$,
- I moment inercije tirnice $[\text{cm}^4]$,
- b širina namišljenega vzdolžnega praga $[\text{cm}]$,
- C koeficient podajnosti tira $[\text{N/cm}^3]$.

Upogibni moment M zaradi posamične kolesne sile Q se izračuna po naslednji enačbi:

$$M = \frac{QL}{4} \cdot \mu \quad [\text{kNm}], \quad (9)$$

pri čemer je μ ordinata vplivnice momenta pod silo Q in je podana z enačbo:

$$\mu = \frac{-(\sin\xi - \cos\xi)}{e^\xi}. \quad (10)$$

Največjo vrednost upogibnega momenta M_{max} dobimo, če v enačbo (9) vstavimo vrednost $\mu = 1$:

$$M_{max} = \frac{QL}{4}. \quad (11)$$

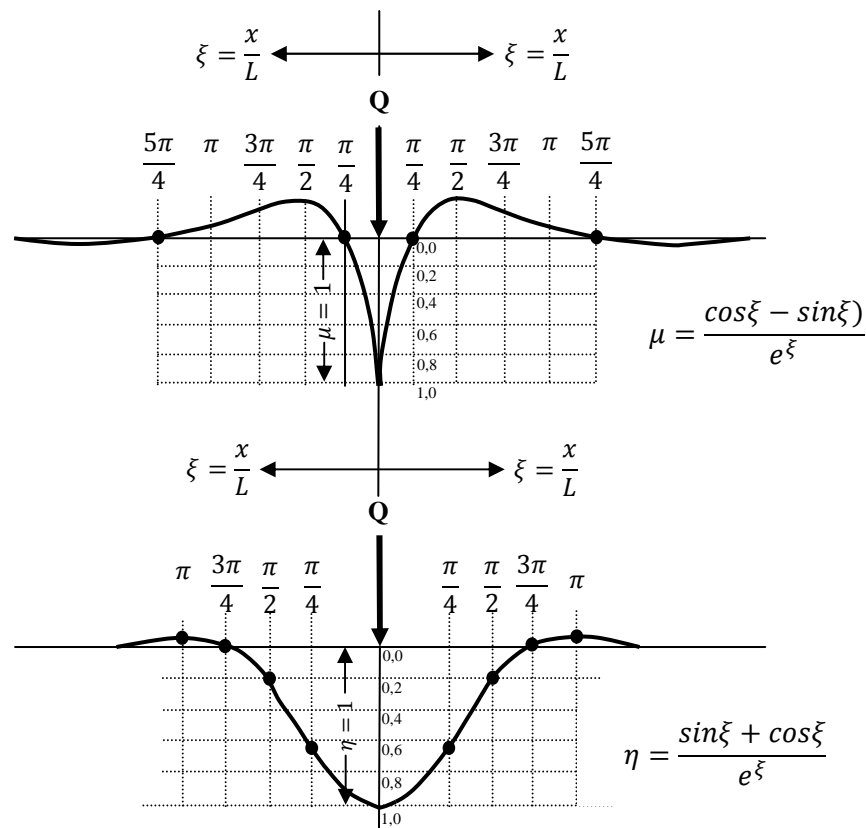
Pritisk na gredo p zaradi posamične sile Q izračunamo tako, da enačbo (6) pomnožimo s koeficientom podajnosti tira:

$$p = \frac{Q}{2bL} \cdot \eta \quad [\text{N/cm}^2]. \quad (12)$$

Upogibno napetost v tirnici pri statični prometni obremenitvi mirujočega vozila se izračuna tako, da se upogibni moment deli z odpornostnim momentom W tirnice, in sicer:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W}. \quad (13)$$

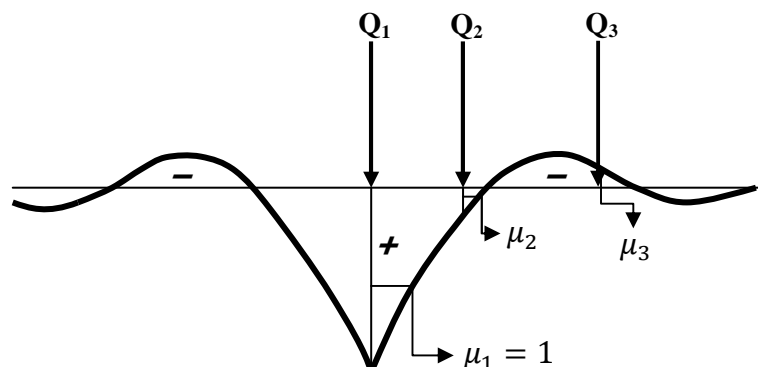
Dosedaj izpeljane enačbe za izračun upogibnega momenta M , pritiska praga na gredo p in upogiba y , veljajo za posamične kolesne sile, ki so od prijemašča sile oddaljene za $x = L\xi$. Spremenljivki μ in η sta funkciji spremenljivke ξ in sta grafično prikazani na sliki 16.



Slika 16: Vplivnica za upogibni moment (levo) in vplivnica za upogib tirnice (desno)

(Zgonc, 2012, str. 49)

Če deluje več sil, prihaja do prekrivanja vplivov posameznih sil. Na ta način se vrednosti upogibnega momenta M , pritiska p in upogiba tirnice y povečujejo ali pa zmanjšujejo v odvisnosti od tega, ali se nahajajo v pozitivnem ali v negativnem območju vplivnice.



Slika 17: Vplivnica za upogibni moment pri skupini sil

(Milojković, 1986, str: 70)

Upogibni moment, pritisk na podlago in upogib tirnice pri delovanju več sil, se izračunajo po naslednjih enačbah:

$$M = \frac{L}{4} \sum_{i=1}^n (Q_1 \mu_1 + Q_2 \mu_2 + \dots + Q_n \mu_n), \quad (14)$$

$$y = \frac{1}{2bCL} \sum_{i=1}^n (Q_1 \eta_1 + Q_2 \eta_2 + \dots + Q_n \eta_n), \quad (15)$$

$$p = \frac{1}{2bL} \sum_{i=1}^n (Q_1 \eta_1 + Q_2 \eta_2 + \dots + Q_n \eta_n). \quad (16)$$

Pri dosedanjih izračunih, se statično vertikalno kolesno silo Q , ki je posledica pritiska kolesa na tirnico v stanju mirovanja, lahko določi na razmeroma enostaven način in sicer kot polovico obtežbe po osi tirnega vozila:

$$Q = \frac{P}{2} [\text{kN}]. \quad (17)$$

Za izračun upogibnih napetosti v tirnici zaradi dinamične obtežbe moramo najprej določiti vrednost dinamične kolesne sile pri gibanju, ki je odvisna od številnih faktorjev, kot so velikost osne obremenitve vozila, stanje kolesnih vencev, hitrost gibanja vozila, stanje elementov zgornjega in spodnjega ustroja, vrsta in tip lokomotive in številni drugi (Milojković, 1986). Pri gibanju tirnega vozila se statična kolesna sila povečuje za vrednost dinamičnega vpliva. Dinamična kolesna sila je lahko tudi do 60 % večja od statične kolesne sile. Za izračun dinamične sile je potrebno določiti dinamični koeficient α , s katerim pomnožimo statične vrednosti sil.

Za izračun dinamičnega koeficienta α obstaja v literaturi veliko različnih enačb. Nekatere enačbe temeljijo na predpostavkah, ki le v grobem povzamejo dejansko dogajanje v tiru. Ena izmed boljših metod izračuna dinamičnega koeficienta, ki se v novejšem času uporablja, je izračun po Eisenmannu. V tem primeru se dinamični koeficient izračuna po naslednjih enačbah (Zgonc, Sile in napetosti v zgornjem ustroju):

$$\alpha = 1 + ts \quad \text{za } V < 60 \frac{\text{km}}{\text{h}}, \quad (18)$$

$$\alpha = 1 + ts \left(1 + \frac{V-60}{140} \right) \quad \text{za } 60 \leq V \leq 200 \text{ km/h}, \quad (19)$$

pri čemer je:

- α dinamični koeficient,
 t faktor statistične verjetnosti (1-kratnik, 2-kratnik, 3-kratnik)
 s standardna deviacija.

Iz enačb (18) in (19) je razvidno, da Eissenmann pri izračunu dinamičnega koeficienta poleg hitrosti V upošteva tudi stanje zgornjega ustroja s in statistično verjetnost zajetja dinamičnih vplivov t in s tem v veliki meri odpravlja pomanjkljivosti enačb nekaterih drugih avtorjev.

Stanje zgornjega ustroja se zajame s standardno deviacijo s , katere vrednost znaša za zelo dobro stanje zgornjega ustroja 0,1, za dobro stanje 0,2 in za slabo stanje zgornjega ustroja 0,3.

Obseg statistične verjetnosti upoštevamo z enkratnikom, dvokratnikom ali trikratnikom standardne deviacije, pri čemer je na primer pri trikratniku standardne deviacije verjetnost, da določene sile ne bodo upoštevane le 0,15 % (Zgonc, 2012).

Dopustne upogibne napetosti pri dinamični obtežbi so odvisne od natezne trdnosti tirničnega jekla in od vrste tira. Izračunane upogibne napetosti v nogi tirnice ne smejo biti višje od dopustnih upogibnih napetosti, podanih v spodnji tabeli.

Preglednica 5: Dopustne upogibne napetosti v tirnici (Lichtberger, 2005, str: 65)

Min. natezna trdnost tirničnega jekla [N/mm ²]	Neprekinjeno zavarjeni tir [N/mm ²]	Stikovani tir [N/mm ²]
680	245	280
880 (oblika 49E1/54E1/60E1)	282	320

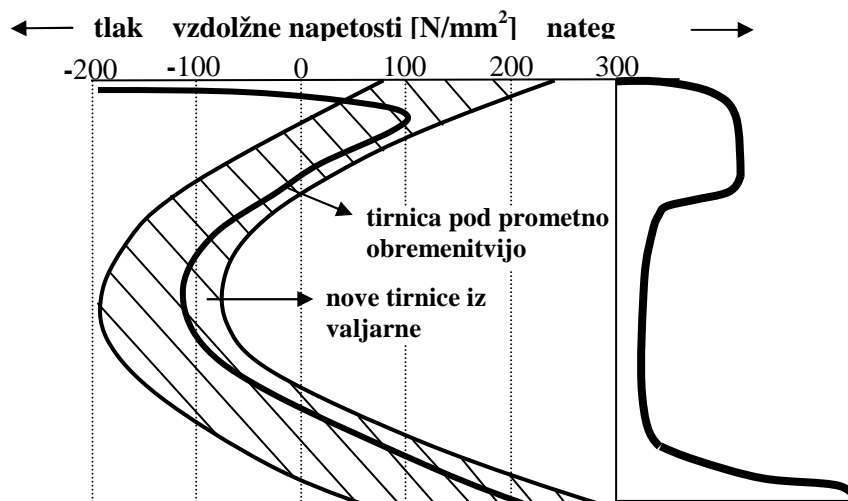
Upogibno napetost v tirnici zaradi dinamične obremenitve se izračuna tako, da se upogibni moment izračunan po enačbi (11) pomnoži z dinamičnim koeficientom α , kot prikazuje enačba (20). Tako izračunane upogibne napetosti v nogi tirnice morajo biti manjše od dopustnih. Napetosti zaradi temperaturnih sprememb in zaostale napetosti, se ne prištevajo izračunanim upogibnim, saj so bile te uporabljene le za določanje višine dopustnih napetosti.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}\alpha}{W} \leq \sigma_{dop} \quad (20)$$

2.7.2 Notranje zaostale napetosti

Notranje zaostale napetosti v tirnici so posledica proizvodnega procesa, zlasti procesa ravnanja s pomočjo valjev. V fazi uporabe tirnice se posledice zaostalnih napetosti odražajo v obrabi in plastičnih deformacijah na vozni površini. V kombinaciji z zunanjimi statičnimi in dinamičnimi obremenitvami lahko zaostale napetosti povzročijo resne poškodbe, ki lahko vodijo do predčasne odpovedi tirnice, kar povzroča visoke stroške, povezane s sanacijo poškodovanih tirnic.

Postopek ravnanja tirnic, ki se izvaja v sklopu proizvodnje, povzroča v tirnicah, predvsem v vzdolžni smeri, nastajanje notranjih napetosti. Med ravnanjem je tirnica izpostavljena izmeničnemu upogibanju, pri čemer lahko napetosti na vozni površini tirnice in v srednjem območju noge tirnice dosežejo polovično vrednost napetosti na meji tečenja. Natezne napetosti v glavi tirnice proti notranjosti postopoma prehajajo v tlačne. Iz slike 18 je razvidno, da napetosti dosežejo ničelno točko v prehodnem območju med glavo in vratom tirnice ter med vratom in ного tirnice. V osrednjem delu vratu tirnice lahko tlačne napetosti dosežejo vrednost 200 N/mm^2 (Lichtberger, 2005). Na sliki 18 je prikazana porazdelitev in velikost notranjih napetosti po tirničnem prerezu v primerjavi s potekom napetosti, ki so posledica obremenitev prometa.



Slika 18: Zaostale napetosti v novih tirnicah in napetosti v tirnicah zaradi prometne obremenitve

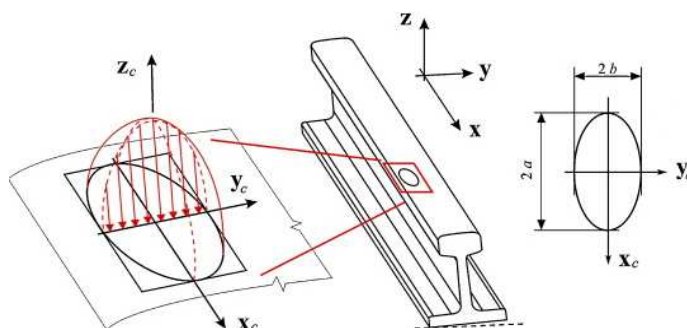
(Lichtberger, 2005, str. 117)

Visoke notranje napetosti so lahko razlog za nastanek deformacij v tirnici. Iz tega razloga je pomembno, da se tovrstne napetosti čim bolj reducira. Velikost zaostalnih napetosti je namreč odvisna od razdalje med posameznimi ravnalnimi valji. Kot navaja Lichtberger (2005), se lahko zaradi povečanja medosne razdalje med ravnalnimi valji zaostale napetosti zmanjšajo za več kot 30 %. Druga možnost je uporaba gumijastih valjev iz poliamida, ki zmanjšajo zaostale napetosti v glavi in nogi

tirnice za približno 30 %, v vratu tirnice pa za približno 10 %. S posebnimi ukrepi med postopkom ohlajanja tirnic v proizvodnji se lahko zagotovi dokaj ustrezna »ravnost«, zaradi česar so kasneje pri ravnanju s pomočjo valjev potrebne manjše sile, s tem pa so manjše tudi notranje napetosti.

2.7.3 Napetosti v stiku med kolesom in tirnico

Tirnica je v glavi obremenjena upogibno, tlačno in torzijsko, zato na tem mestu nastopa večosno napetostno stanje. Prometna obremenitev se s kolesa na tirnico prenaša preko zelo majhne elipsaste kontaktne površine (Hertzova površina), kot je prikazano na spodnji sliki.

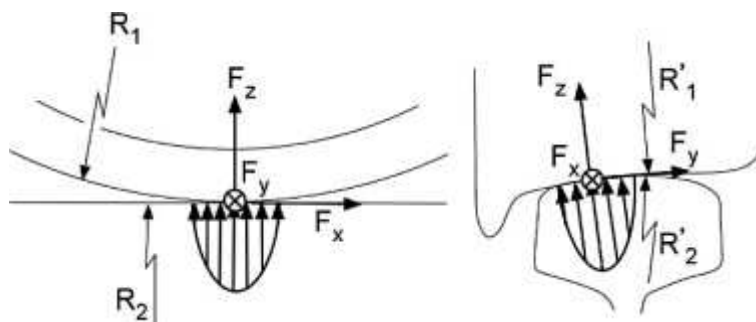


Slika 19: Kontaktna površina med kolesom in tirnico

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164811005631> (20.4.2013))

Sile, ki na tem mestu delujejo na tirnico, so (Brčić, 2011):

- gravitacijska sila F_z ,
- tangencialna vzdolžna sila (vlečna sila ali sila zaviranja) F_x ,
- tangencialna prečna sila (sila bočnega vodenja) F_y .



Slika 20: Sile na mestu kontakta kolesa in tirnice in porazdelitev kontaktnih napetosti

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794409002707> (20.4.2013))

Po Hertzovi teoriji se srednja vrednost kontaktnega pritiska kolesa na tirnico izračuna po naslednji enačbi (Lichtberger, 2005):

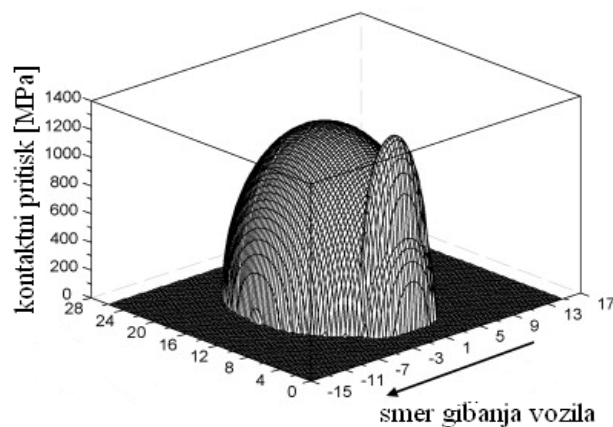
$$p = 1374 \cdot \sqrt{\frac{Q}{r}} \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad (21)$$

pri čemer je:

Q statična kolesna sila [N],

r polmer tirnega kolesa [mm].

Posledica sil velikih intenzitet, ki delujejo na majhno elipsasto površino je ta, da kontaktne tlačne napetosti na tem delu dosežejo zelo velike vrednosti (preko 1000 MPa). Takšne vrednosti presegajo mejo elastičnosti večine tirničnih jekel. Kontaktne normalne napetosti so na površini v vseh treh smereh približno enake, zato kljub visokim vrednostim ne pride do plastičnih deformacij, pač pa le do povečanja trdote površine tirnice (Zgonc, Sile in napetosti v zgornjem ustroju).

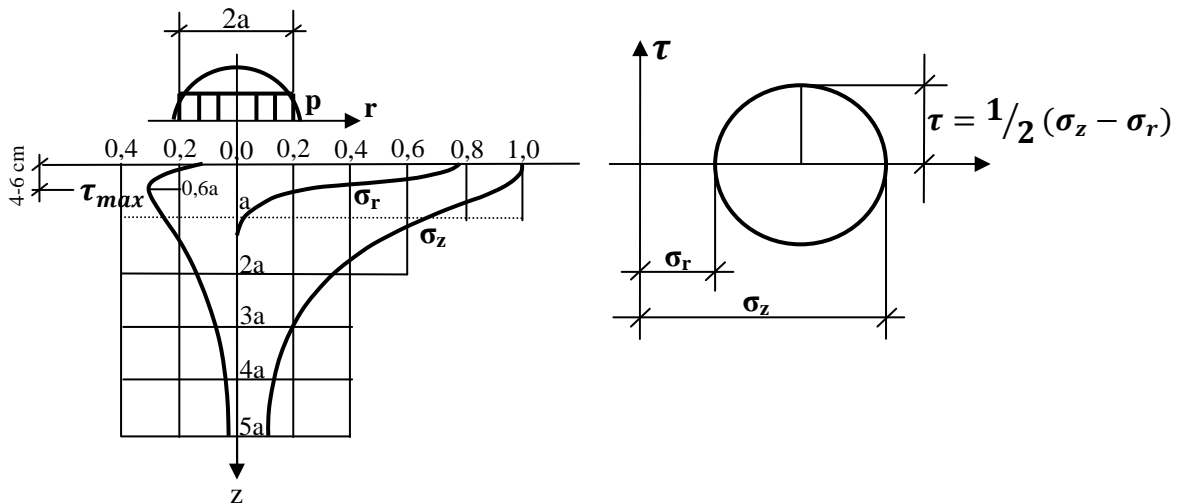


Slika 21: Distribucija kontaktnih pritiskov na stiku med kolesom in tirnico

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808001695> (20.4.2013))

2.7.4 Tangencialne napetosti v glavi tirnice

Največje vrednosti tangencialnih napetosti se pojavljajo na oddaljenosti 4–6 mm pod vozno površino. Na tem mestu so prisotne vertikalne tlačne napetosti σ_z in horizontalne radijalne napetosti σ_r . Posledica različnih vrednosti omenjenih napetosti je nastanek tangencialnih napetosti, ki jih lahko ponazorimo z Mohrovim krogom (Zgonc, Sile in napetosti v zgornjem ustroju).



Slika 22 : Napetosti v polprostoru glave tirnice

(Zgonc, Sile in napetosti v zgornjem ustroju)

Velikost tangencialnih napetosti je v glavnem odvisna od oblike vozne površine, polmera kolesa, velikosti obtežbe itd. V primeru večjih osnih obremenitev, so tangencialne napetosti za določeno kvaliteto tirnice, lahko večje od dovoljenih. Zaradi tovrstnih napetosti v glavi tirnice pogosto prihaja do poškodb v obliki lupljenja vozne površine (Marušić, 2009).

Maksimalno tangencialno napetost v glavi tirnice, lahko izračunamo po naslednji enačbi (Zgonc, Sile in napetosti v zgornjem ustroju):

$$\tau_{max} \approx 0,3p \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad (22)$$

pri čemer p predstavlja srednjo vrednost kontaktnega pritiska kolesa na tirnico, ki ga po Hertzovi teoriji izračunamo na podlagi enačbe (21). Z upoštevanjem enačb (21) in (22), dobimo enačbo za maksimalno tangencialno napetost τ_{max} v naslednji obliki:

$$\tau_{max} = 412 \sqrt{\frac{Q}{r}}. \quad (23)$$

Iz enačbe (23) je razvidno, da je maksimalna tangencialna napetost odvisna predvsem od polmera tirnega vozila.

Dopustne tangencialne napetosti izračunamo po naslednji enačbi:

$$\tau_{dop} = \frac{\sigma_{dop}}{\sqrt{3}}. \quad (24)$$

Pri tem lahko σ_{dop} nadomestimo s 50 % vrednostjo natezne trdnosti tirničnega jekla σ_z in dobimo:

$$\tau_{dop} = 0,3\sigma_z \quad (25)$$

Na podlagi enačb (23) in (24) lahko izračunamo dopustno statično kolesno silo Q_{dop} , po naslednji enačbi:

$$Q_{dop} = 4,9 \cdot 10^{-7} r \sigma_z^2 \text{ [kN]}, \quad (26)$$

pri čemer je:

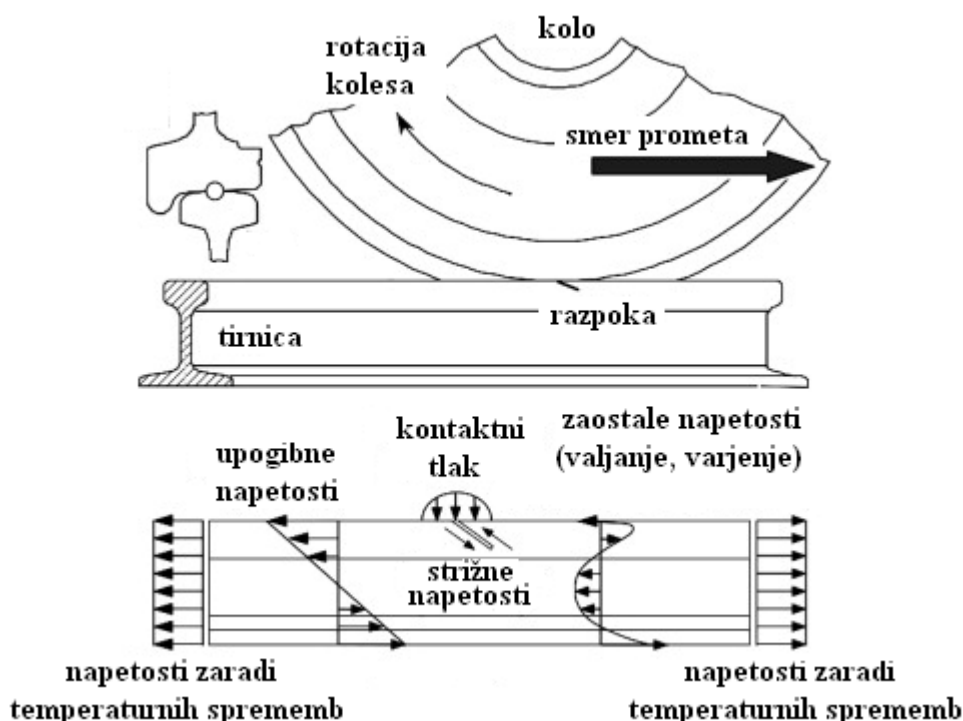
- Q_{dop} dopustna statična kolesna sila [kN],
- r polmer kolesa tirnega vozila [mm],
- σ_z natezna trdnost tirničnega jekla [N/mm^2].

2.7.5 Napetosti zaradi temperaturnih sprememb

Zaradi temperaturnih sprememb se v tirnicah pojavljajo velike vzdolžne sile. Pri višanju temperature se tirnice raztezajo, medtem ko se pri padanju temperature tirnice krčijo. Zaradi tega je v začetni fazi gradnje prog veljalo, da se v tir vgrajujejo tirnice s takšno dolžino in dilatacijo, da se bodo tirnice lahko prosto raztezale oziroma krčile v odvisnosti od temperature. Ker je maksimalna širina dilatacije iz konstruktivnih razlogov navzgor omejena in znaša 20 mm, je s tem postala omejena tudi dolžina tirnic, ki so se lahko vgrajevale v tir. Vedno boljši pritrdilni pribor in večji odpor med pragi in tirno gredo je že pri stikovanem tiru omogočil vgrajevanje daljših tirnic tudi preko mere, ki so jo še dopuščale največje možne dilatacije. Prehod iz klasičnega stikovanega tira na tir brez stikov, to je na neprekinjeno zavarjeni tir (v nadaljevanju NZT) je omogočilo poznavanje teorije napetosti zaradi temperaturnih sprememb v zgornjem ustroju železniških prog. Pri NZT dilatacij ni, zato se v notranjosti tirnic, pri spreminjanju temperature, pojavljajo napetosti, ki jih je potrebno z ustreznimi ukrepi obvladati (Zgonc, 2010). Teorija napetosti zaradi temperaturnih sprememb v NZT je podrobneje razložena v poglavju 3.4.1.

2.8 Napake v tirnicah

V današnjem času so tirnice izpostavljene vse večjim hitrostim in osnim obremenitvam. Glava tirnice, oziroma vozna površina in robovi prenašajo izredno visoke napetosti, ki so ne samo posledica visokih dinamičnih obremenitev, ki jih povzroča promet, ampak tudi posledica samega proizvodnega procesa, varjenja in nenazadnje tudi posledica temperaturnih sprememb v tirnici (slika 23). Zaradi tega v praksi pogosto prihaja do poškodb vozne površine tirnice. Po Zaletelj, Flerin (2006) napake, ki nastanejo preko reakcij in učinkov voznega sredstva, skupaj z geometrijskimi napakami (oblika profila tirnice, obraba v krivinah, tirna širina, vgrajen naklon tirnice, pritrditvev tirnice), občutno vplivajo na tekalno sposobnost tira.



Slika 23: Napetosti, ki delujejo v tirnici

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630710001056> (5.1.2013))

Vsaka poškodba ima po UIC-klasifikaciji napak (UIC Code 712 R) svoj naziv in šifro sestavljeno iz treh ali štirih števil. Vse napake se registrirajo in beležijo v mednarodni statistiki napak.

Prva številka označuje položaj napake v tirnici

- napake na tirničnih krakih,
- napake na sredini tirnic,
- napake pri varjenju in navarjanju.

Druga številka označuje:

- mesto v profilu tirnice, ki je izvor napake,
- vrsta varjenja, če gre za napako pri varjenju ali navarjanju.

Tretja številka označuje:

- smer poteka napake v primeru zloma ali risa,
- vrsta napake v primeru poškodbe,
- vzrok napake v primeru poškodbe.

Četrta številka omogoča po potrebi dodatno kategoriziranje vrste napake.

Najpogostejše napake, ki se pojavljajo na vozni površini tirnice v obliki neravnin so predvsem rebričenje tirnic, kratki in dolgi valovi. Na visokoobremenjenih progah postajajo danes vse večji problem napake, ki so posledica kontaktnega utrujanja materiala ali tako imenovane RCF (angl. Rolling Contact Fatigue) napake. Najpogosteje se takšne napake pojavljajo v obliki drobnih površinskih razpok oziroma zarez na voznom robu glave tirnice (angl. head checks) ali pa v oblik luščenja tirnic (angl. Schelling effect).

2.8.1 Rebričenje tirnic

Pomeni kratko valovito obrabo vozne površine glave tirnice. Gre za periodične neravnosti na vozni površini tirnične glave, ki se pojavljajo v premi in v krožnih lokih z velikimi polmeri. Dolžina vala se giblje od 30–80 mm (najpogostejša dolžina vala je od 40–50 mm), medtem ko se globina vala giblje med 0,1–0,4 mm (povprečna globina znaša 0,1 mm). Pri rebričenju tirnic so grebeni nekoliko svetlejšje barve, vdolbine oziroma uvale pa nekoliko temnejše barve (Marušić, 2009). Na sliki 24 je prikazana tirnica, na kateri se opazi pojav rebričenja. Trdota vozne površine je na grebenih večja v primerjavi s trdoto v uvalah (razlika je tudi do 100 HB). Posledica velikih napetosti na kontaktni ploskvi kolo-tirnica in razlik v trdoti tirničnega jekla je neenakomerna obraba vozne površine glave tirnice. Po Hertzovi teoriji znaša pritisk v točki kontakta kolesa in tirnice okoli 1000 N/mm^2 , pri večjih dinamičnih učinkih pa tudi 2000 N/mm^2 . Rezultati raziskav in merjenj kažejo, da lahko že pri vožnji z relativno majhno hitrostjo po tirnicah, na katerih je prisotna rebričenost, masa vozila povzroči dvakrat večjo osno obtežbo in znatno poveča statični pritisk kolesa na tirnico, kar vpliva na pojav poškodb tira (Milojković, 1986).



Slika 24: Prikaz rebričenja tirnic

(Marušić, 2009, str. 12)

Rebričenje tirnic je specifičen pojav in se lahko pojavi pri vseh pogojih geometrije tira, vrste vleke, intenzivnosti prometa in klime. Pojav rebričenja torej ne pogojuje niti trdota tirničnega jekla niti postopek proizvodnje tirnic. Zaradi tega je zelo težko določiti vzrok nastanka tega pojava, katerega posledice so očitne. Kadar globina valov doseže 0,4–0,5 mm, je potrebno tirnice zamenjati.

Kot navaja Miljković (1986) obstaja več teorij o vzrokih pojava rebričenja tirnic. Pravi vzrok ni popolnoma pojasnjen. Glede na ugotovitve nekaterih avtorjev je več deset odstotkov proge podvrženim temu pojavu. Po eni izmed teorij med proizvodnjo tirnic, in sicer v fazi ohlajanja, v glavi tirnice nastajajo tako imenovane cone »odcejanja«, v katerih se koncentrirajo določeni elementi, kar vpliva na razliko v trdoti jekla in kasneje na neenakomerno obrabo glave tirnice. Kot vzrok nastanka rebričenja se navaja tudi vertikalne oscilacije vozila. Dejstvo je, da se pri tirnih stikih ali okolici zvarov pri neprekinjeno zavarjenih tirih pogosto pojavlja rebričenje na omejeni dolžini 1–2 m, ker so denivelirana mesta na vozni površini razlog za osciliranje vozila.

Zagrebski profesor Prister je postavil teorijo po kateri v momentu drsenja kolesa po tirnici prihaja do pojava izredno visokih temperatur in do zakalitve jekla na glavi tirnice, to je do tvorjenja martenzitne strukture jekla. Ta teorija je smiselna, saj imajo grebeni in vdolbine pri rebričenju različno trdoto.

Večina avtorjev je danes mnenja, da je pojav rebričenja izredno specifičen pojav, do katerega prihaja zaradi združevanja večih faktorjev, ki lahko vplivajo na nastanek tega pojava.

Pri prehodu vozila preko delov tirnic, na katerih je prisotno rebričenje, se pojavlja velik hrup. Z vožnjo po takšnih odsekih prihaja do povečanih oscilacij vozila, zaradi česar je potrebno rebričenje, tudi če je prisotno zgolj v manjšem obsegu, sanirati. Kot posledica povečane oscilacije in vibracij prihaja tudi do popuščanja pritrdilnega materiala ter drobljenja in zaglajevanja tolčenca izpod pragov. Takšna mesta zahtevajo stalne intervencije službe za vzdrževanje proge, vendar se stanje znova in znova ponavlja, če

ni odpravljen osnovni vzrok, to je rebričenje tirnic. Pogostokrat prihaja zaradi povečanih vibracij in dinamičnih preobremenitev tudi do ustvarjanja notranjih razpok v tirnicah. Posebno pozornost je potrebno posvetiti okolici zvarov v neprekinjeno zavarjenem tiru.

2.8.2 Kratki valovi

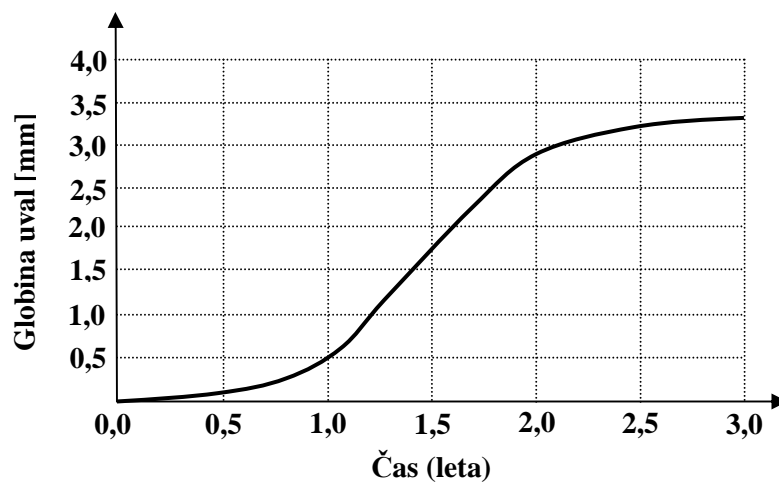
To so periodične neravnine na vozni površini tirnične glave, dolžine 80–250 mm in do 2 mm globine (slika 25). Ta znaša v povprečju 0,25 mm. Napake prevladujejo v krivinah, kjer so polmeri okoli 600 m (Marušić, 2009).



Slika 25: Kratki valovi

(Schoech, 2007, str. 2)

Napredovanje globin valov pri pojavu valovitosti vozne površine je prikazan na grafu 2. Opaziti je mogoče, da napredovanje globine uval ne poteka linearno. V vsakem primeru je to odvisno od količine bruto prevoženega prometa (velikosti prometne obremenitve), kar ni razvidno iz prezentiranega diagrama (Marušić, 2009).



Graf 2: Napredovanje globin valov

(Marušić, 2009, str. 10)

2.8.3 Dolgi valovi

To so neravnine na vozni površini tirnične glave, dolžine 250–2200 mm in do 1,5 mm globine. Ta znaša v povprečju 0,7 mm. Napake prevladujejo v premah in krivinah. Ker dolgi valovi predstavljajo mejno vrednost dolžine obrabe tirničnega jekla, valov, ki so daljši od te vrednosti, ne smatramo za obrabo tirnic, temveč jih tretiramo kot napake nivelete tira. Dolgi valovi imajo lahko velik vpliv pri vožnji z velikimi hitrostmi (140–200 km/h), pri čemer je lahko ogrožena varnost prometa. Če je podlaga slabša, imajo lahko dolgi valovi škodljive posledice na tir že pri nižjih hitrostih (Milojković, 1986).



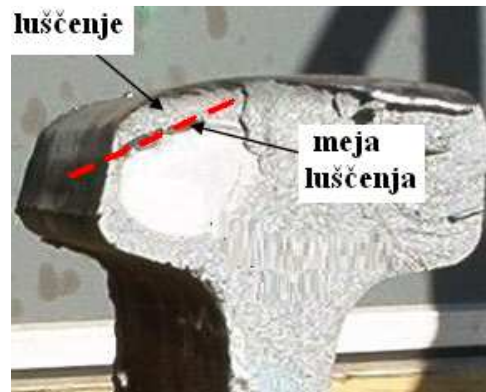
Slika 26 : Dolgi valovi

<http://www.speno.ch/pdf/RailwayEngineering2007.pdf> (10.2.2013))

Dolgi valovi znatno povečujejo napetosti v tirnicah, zato jih je potrebno, čim se pojavijo, odstraniti. Ta fenomen se v primerjavi s kratkimi valovi nekoliko redkeje pojavlja na naših progah.

2.8.1 Luščenje tirnic

Posledica tangencialnih napetosti (poglavje 2.6.4) je pojav majhnih razpok, in sicer na mestu tik pod vozno površino, kjer so vrednosti tangencialnih napetosti največje. Razpoke se s časom povečujejo, in medseboj povezujejo, kar na koncu privede do loma ali odpadanja dela glave tirnice oziroma do luščenja plasti na vozni površini (Marušić, 2009).

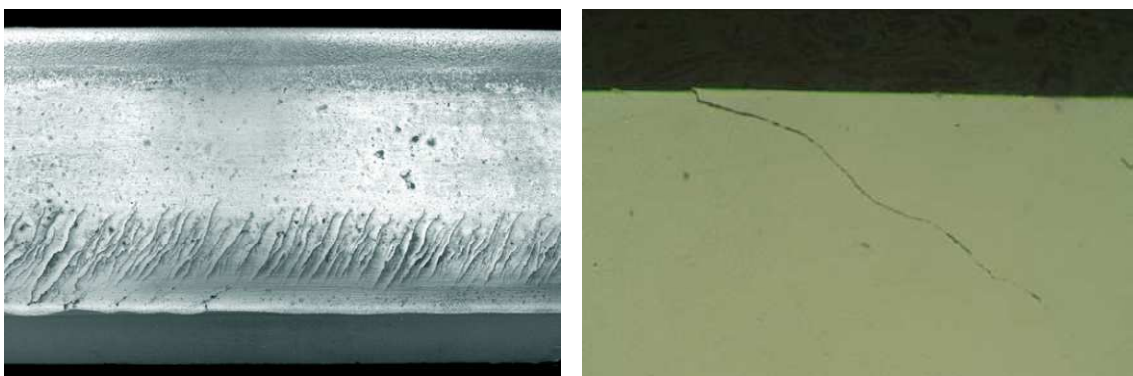


Slika 27: Luščenje tirnic

http://www.wins-ndt.com/ultrasonic_rail_flaw_detection.php (14.3.2013))

2.8.2 Drobne površinske razpoke

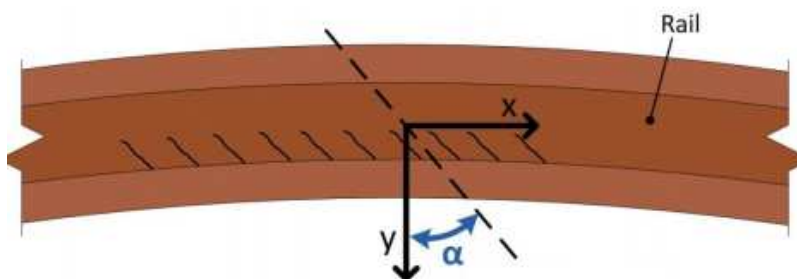
Poškodbe tirnic zaradi kotalnega kontaktnega utrujanja materiala (RCF) so ene izmed glavnih groženj železniški infrastrukturi pri sodobnih pogojih uporabe tirnic. Zaradi vedno večjih tehnoloških zahtev pri tirnicah, ki jih pogojuje trend prog z visokimi hitrostmi in povečanje tovrstnega prometa, naraščajo tudi obremenitve v dotikalnem območju med kolesom in tirnico, posledica česar je nastanek poškodb zaradi kontaktnega utrujanja materiala. Med tovrstne poškodbe uvrščamo drobne razpoke v obliki lasu, ki se pojavljajo na notranjem robu vozne površine tirnične glave. Po UIC klasifikaciji so takšne poškodbe poimenovane z izrazom »Head Check«.



Slika 28: Drobne površinske razpoke (»Head Checks«) na robu vozne površine tirnične glave (levo), prečni prerez tirnice in vidna razpoka z globino 0.15 mm (desno)

(<http://epubl.ltu.se/1402-1544/2006/11/LTU-DT-0611-SE.pdf> (18.1.2013))

Tanke razpoke na tirnični glavi so tipične napake kotalnega kontaktnega utrujanja materiala, ki v dokaj hitrem času nastanejo na mestih, kjer so dinamične obremenitve na tirnico največje. Pojavljajo se predvsem na voznem robu notranje in zunanje tirnice v krivinah s polmerom 400–1500 m (v zelo ostrih krivinah tovrstne poškodbe zaradi obrabe materiala na zunanji tirnici ne nastajajo), posamično tudi na voznem robu tirnice v krivinah s polmerom večjim od 1500 m, ter izmenično na voznem robu obeh tirnic v premi. Površinske zarez nastajajo bolj ali manj v kontinuiranem razmaku 2–10 mm. Praviloma so te razdalje pri tirnicah s povečano trdoto »HSH« manjše kot pri trnicah z vrsto jekla R260 in lahko znašajo le 0,5 mm. Lega zarez, gledano od zgoraj, poteka pod kotom od 35° do 70° , odvisno od vzdolžne osi tira, obremenitev in hitrosti (slika 29). V nekaterih primerih lahko zarez ležijo pravokotno na vzdolžno os tira. V tem primeru je kot $\alpha = 90^{\circ}$ (Grohmann, Schnitzer, 2003).



Slika 29: Lega zarez na voznem robu zunanje tirnice

(Grohmann, Schnitzer, 2003)

Mnoge raziskave so potrdile, da se majhne razpoke v začetni fazi širijo pod kotom 15° proti notranjosti glave tirnice, v smeri gibanja vlaka. Kadar poškodba doseže tipično globino 10 mm, se kot širjenja poveča na 70° in razpoke se širijo skozi tirnico vse do loma. V določenih stopnjah razvoja lahko prihaja do (Flerin, 2004):

- združevanja posameznih zarez, ki povzročajo izpad materiala na voznem robu,
- razcepitve zarez v notranjosti glave tirnice,
- nadaljnjega razvoja majhnih zarez,
- sprememb smeri nekaterih zarez, ki vodijo do pravokotnega trajnega zloma.

Zaradi naštetega, se tovrstne napake uvrščajo med potencialno zelo nevarne. Vzroki za njihov nastanek, so izključno velike obremenitve tirnice. Na mestu kontakta med kolesom in tirnico nastajajo velike vzdolžne in prečne sile, kar povzroča velike kontaktne napetosti. Pogoji, pri katerih pride do kontakta povzročajo konstanto naraščanje napetosti v tirničnem jeklu (površinska hrapavosti kolesa in tirnice posledično povzroča velike kontaktne napetosti). Ta pojav se znova in znova ponavlja, in sicer z vsakim preходом kolesa preko tirnice. Vsak prehod kolesa povzroča obrabo in utrujanje materiala, pričakovana življenjska doba tirnice pa je odvisna prav od teh dveh procesov. Napetosti, ki nastajajo

pri kontaktu, lahko zaradi svoje velikosti povzročijo nastanek plastičnih deformacij. V okviru cikličnih obremenitev se plastične deformacije kopičijo, dokler duktilnost tirničnega materiala ni izčrpana, kar privede do nastanka deformacij kot posledica kontaktnega utrujanja materiala. Raziskave kažejo, da prihaja na površini do nastanka mikrorazpok že v nekaj tednih po vgradnji tirnic (Fendrich, 2006).

Napake je možno zaznati z ročnimi ultrazvočnimi napravami in napravami, ki so nameščene na merilnih vlakih. Pomembno je ugotavljanje globine zarez. V primeru, da globina ni prevelika, je možna odprava tovrstnih napak z brušenjem. Če se napake ne odstrani pravočasno, se lahko te povečajo in povzročijo resnejše poškodbe, kot na primer luščenje oziroma odpadanje materiala na in v okolici roba vozne površine. V primeru močnejšega povečanja površinskih razpok lahko pride do nenadne spremembe usmeritve rasti, pri čemer se deformacije širijo navpično navzdol v globino tirnične glave, kar vodi do popolnega preloma (slika 30).



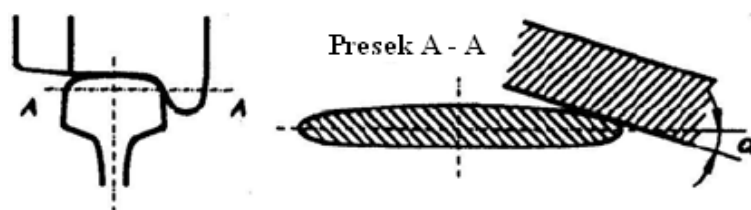
Slika 30: »Head Check« napake na robu vozne površine (levo), prečni zlom v glavi tirnice, ki izhaja iz napak »Head Check« (desno)

(<http://www.railway-research.org/IMG/pdf/112.pdf> (20.2.2013))

2.9 Obraba tirnic

Vzajemno delovanje kolesa in tirnice je fizikalna osnova za gibanje tirnih vozil po tirnicah. Pri gibanju vozila po tirnici, prihaja na mestu kontakta kolo-tirnica do pojava napetosti, deformacij in trenja, posledica česar je obraba vozne površine glave tirnice. Na obrabo tirnic vpliva več parametrov, ki so medsebojno odvisni, in sicer: geometrijske karakteristike proge (velikost polmera krivin, nagib nivelete), osni pritiski, mehanske lastnosti tirnic in koles, hitrosti na progi, količina in frekventnost prometa itd. Pri procesu obrabe tirnic prihaja do odvajanja materiala z vozne površine. Vzporedno s tem se manjša tudi površina prečnega prereza, zato je velikost obrabe navzgor omejena iz razloga, da ne bi prišlo do iztirjenja vozila (Zaletelj, Flerin, 2006).

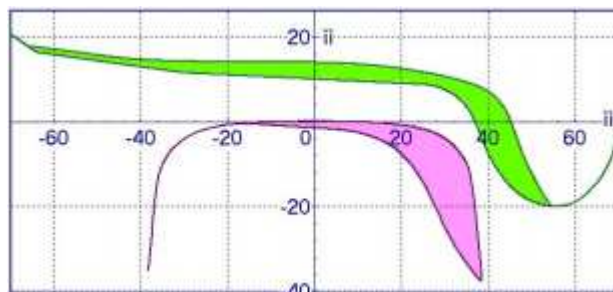
Majhen kotalni upor pri gibanju kolesa po tirnici (koeficient kotalnega upora znaša $\mu_{KO} \approx 0,001$) omogoča tovornemu prometu prevoz težkih tovorov z relativno majhno potrošnjo energije. Maksimalne vrednosti horizontalnih X in vertikalnih Y sil, s katerimi kolo deluje na tirnico, so v krivinah z manjšim polmerom približno enake $Y \approx 0,96X$ (Pletikosić, 2009). Po Milojkoviću (1986) se statične in dinamične sile, ki nastajajo pri vzajemnem delovanju vozila in železniške proge prenašajo na tirnico preko kontaktne površine kolesa in tirnice oziroma preko majhne elipsaste površine. Površina oziroma polmer kontaktne ploskve je odvisen od kota naleta α (slika 31) in vpliva na velikost pritiska, s katerim kolo deluje na tirnico (večji, kot je kot α , manjša je površina kontaktne ploskve).



Slika 31: Odvisnost polmera kontaktne ploskve od kota naleta α

(Marušić, 2009, str. 11)

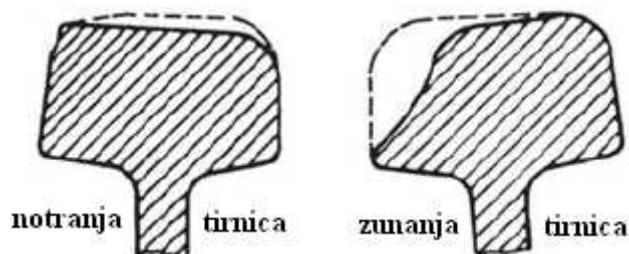
Maksimalni Hertzov pritisk na stiku kotalne površine kolesa in tirnice znaša 1000N/mm^2 , na mestu kontakta kolesnega venca in tirnice pa 4000N/mm^2 . Pritisk, ki nastaja pri bočnem kontaktu kolesnega venca in tirnice, je večji od meje plastičnosti jekla (Pletikosić, 2009). Tudi zaostale napetosti v tirnicah, ki so posledica proizvodnega procesa (ravnanje, neenakomerno ohlajanje) in lahko v vratu tirnice dosežejo vrednosti vse do 200N/mm^2 prav tako prispevajo delež k skupni obremenitvi tirničnega jekla. Takšne napetosti v tirnicah vodijo do obrabe tirničnega jekla v coni glave tirnice in do nastajanja razpok v notranjosti tirnic. V kakšni meri se bodo tirnice obrabljale je med drugim odvisno tudi od kakovosti tirničnega jekla (Milojković, 1985).



Slika 32: Debelina obrabnega sloja na kolesu lokomotive in tirnice UIC 65

(Pletikosić, 2009, str. 320)

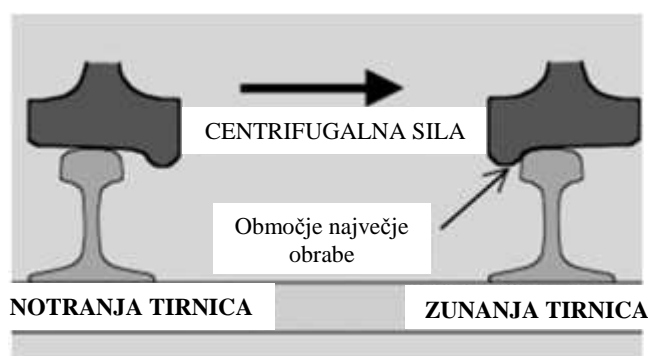
Tirnica se zaradi naštetih faktorjev obrablja višinsko in bočno. V premah se tirnice pretežno višinsko obrabljajo, medtem ko se v krivinah zunanje tirnice obrabljajo višinsko in bočno, notranje tirnice pa le višinsko (slika 33).



Slika 33: Obraba notranje in zunanje tirnice v krivini

(Milojković, 1985, str. 45)

Bočna obraba tirnične glave je torej prisotna predvsem v krivinah, in sicer zaradi delovanja centrifugalne sile, ki vozilo v krivini vleče navzven, pri tem pa venec zunanjega kolesa naleže oziroma pritisne na notranji rob zunanje tirnice, zaradi česar prihaja na tem mestu do povečane obrabe roba tirnične glave. Bočna obraba glave tirnice v krivini je v veliki meri odvisna od velikosti polmera krivine. Tako je lahko v krivinah s polmerom $R = 1000$ m bočna obraba dvakrat manjša, kot v krivinah s polmerom $R = 500$ m in celo trikrat manjša kot v krivinah s polmerom $R = 300$ m. V krivinah z majhnimi polmeri je bočna obraba lahko tako velika, da so presežene dovoljene vrednosti obrabe, zaradi česar je potrebna pogosta zamenjava zunanje tirnice (Milojković, 1986).

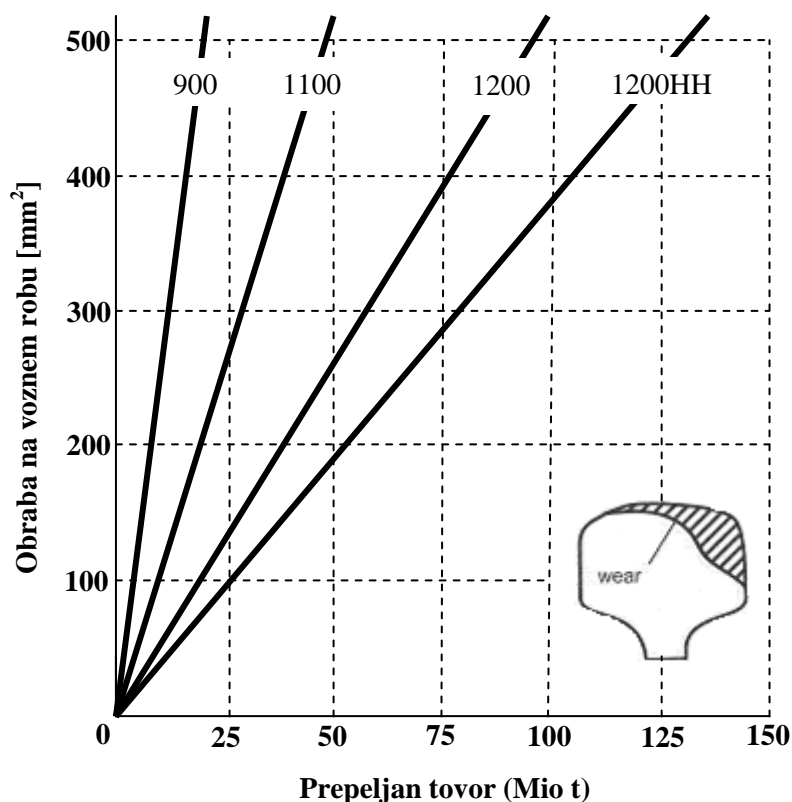


Slika 34: Območje največje obrabe v krivini

(<http://www.eng.monash.edu.au/non-cms/railway/> (8.1.2013))

Povečana obraba se pojavlja tudi na mestih zaviranja in na mestih pospeševanja, zlasti na vzponih. V tem primeru lahko prihaja do specifične obrabe glave tirnice, kot posledica zdrsanja pogonskih koles lokomotive pri speljevanju.

Finoperlitizirane tirnice (HSH) povečane trdote, z vrsto jekla R350HT, imajo vsak dan večji pomen. Največ se uporabljajo na močno obremenjenih in zahtevnih progah, na območjih ozkih krivin in velikih vzponov, kjer je normalno obraba tirnic zelo velika. Razporeditev visoke trdote po prerezu glave tirnice pomeni z vidika življenjske dobe veliko prednost (Zaletelj, Flerin, 2006). Po Lichtbergerju (2005) je življenjska doba HSH tirnic do 7-krat daljša od življenjske dobe tirnic z vrsto jekla R260. Slika 35 prikazuje stopnjo obrabe tirnic različnih kakovosti v testni krivini s polmerom 300 m. Pri HSH tirnicah je v primerjavi s tirnicami kakovosti R320Cr bočna obraba manjša približno za faktor 2,5, v primerjavi s tirnicami kakovosti R260 pa približno za faktor 3 .

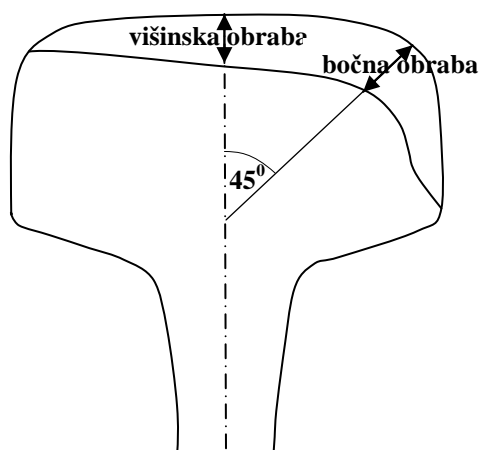


Slika 35: Razmerje obrab tirnic različnih kvalitete v krivini s polmerom 300 m

(Lichtberger, 2005, str. 102)

Razlikujemo dve vrsti obrabe tirnic, in sicer:

- višinska obraba tirnice, ki se meri v vertikalni osi tirnice,
- bočna obraba tirnice, ki predstavlja spremembo orisa tirnične glave na njenem voznom robu in se meri pod kotom 45° .



Slika 36: Višinska in bočna obraba tirnice

(Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010, str. 23)

Glede na dovoljeno obrabo tirnic razlikujemo naslednje vrste tirov oziroma prog (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010):

- vrsta proge 1: glavne proge $120 \text{ km/h} < V \leq 160 \text{ km/h}$,
- vrsta proge 2: glavne proge $V \leq 120 \text{ km/h}$ in regionalne proge $80 \text{ km/h} < V \leq 120 \text{ km/h}$,
- vrsta proge 3: regionalne proge $V \leq 80 \text{ km/h}$ (če je dovoljena hitrost večja kot 80 km/h , samota odsek proge spada v skupino vrsta proge 2),
- vrsta proge 4: stranski postajni in industrijski tiri.

Preglednica 6: Dovoljena obraba tirnic (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010)

Oblika tirnice	Višina nove tirnice	Vrsta proge	Višina obrabljene tirnice	Dovoljena višinska obraba	Dovoljena bočna obraba	Dovoljena vsota višinske in bočne obrabe
60 E	172	1	158	14	19	26
		2	155	17	19	26
		3	154	18	20	32
		4	152	20	20	
54 E	161	1	149	12	15	
		2	145	16	20	28
		3	141	20	20	32
		4	141	20	20	
49 E	149	1	137	12	15	
		2	137	12	15	
		3	133	16	18	
		4	129	20	20	

Višinska in bočna obraba se na naših progah meri periodično, običajno enkrat letno, in sicer ročno z uporabo specialnih orodij (slika 37) ali pa z uporabo merilnega vlaka. Na sliki 37 so vidne točke na glavi tirnice, v katerih se meri obraba.



Slika 37: Naprava za ročno merjenje obrabe tirnice

(<http://www.robel.info/en/products/> (10.3.2013))

2.10 Kontrola stanja tirnic v obratovanju

Kontrola stanja tirnic v obratovanju zajema več meritev, na podlagi katerih lahko ugotavljamo trenutno tehnično stanje tira. Na splošno se kontrola stanja tirnic izvaja z:

- meritvami valovitosti vozne površine in obrabe prečnega profila tirnice,
- ultrazvočnimi pregledi,
- vizualnimi pregledi.

2.10.1 Meritve valovitosti in obrabe prečnega profila tirnic

Meritve napak valovitosti in prečnega profila glave tirnic se na Slovenskih železnicah po potrebi izvajajo z merilnim vlakom Speno SM 775. Največja hitrost pri izvajanju meritev je 80 km/h. Med merilno vožnjo se izpisujejo dejanske vrednosti merjenih parametrov.



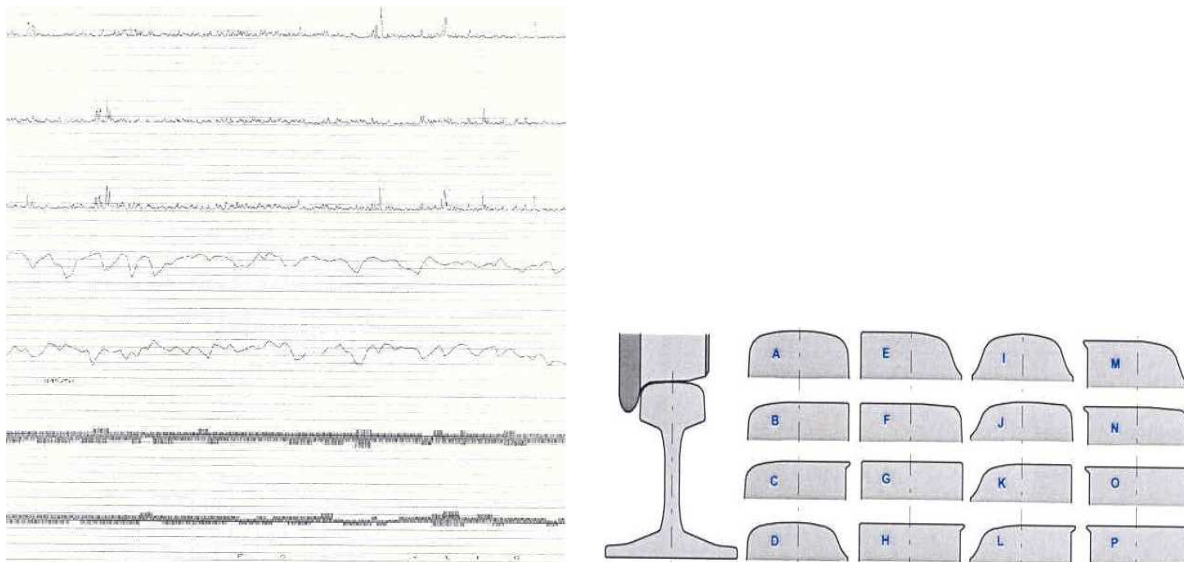
Slika 38: Merilni vlak SPENO SM 775

(http://www.dybas.de/dybas/ne_evu_d/speno/tfz/sm775.html (10.2.2013))

Meritve vzdolžnega profila tirnice služijo za odkrivanje pojavnosti rebričenja, kratkih in dolgih valov, ločeno za vsako tirnico. Meritve prečnega profila služijo za prikaz stopnje deformacije glave tirnice (bočna obraba, ploščatost tirnic). Merjenje prečnega profila glave tirnice se izvaja z brezkontaktnim laserskim merilnim sistemom. Vrednotenje meritev poteka na podlagi primerjave odstopanja merjene površine prečnega profila s prečno površino idealnega profila tirnice.

Rezultati se predajajo v elektronski obliki in v obliki grafikona, na katerem je izrisana obraba leve in desne tirnice s karakterističnim obrabnim profilom A-P (slika 39) ter kratki in dolgi valovi posamezne

tirnice (amplituda in valovna dolžina) na ustreznem odseku proge s kilometrsko »KM« označbo in komentarjem objektov na progi (most, tunel, kretnica, nivojski prehod itd.). Na podlagi teh rezultatov se kasneje planirajo odseki prog za brušenje tirnic (Flerin, 2012).



Slika 39: Diagram meritev merilnega vlaka Speno SM 775 in karakteristični obrabni profili tirnice
(Flerin, 2012, str. 3)

2.10.2 Ultrazvočni pregled tirnic

Neporušne metode (uporablja se tudi izraz »defektoskopija«) se ukvarjajo s problematiko ocenjevanja stabilnosti kvalitete materiala in konstrukcij pri pogoju, da se pregledi ali kontrole opravljajo brez vpliva na funkcionalnost testiranega objekta.

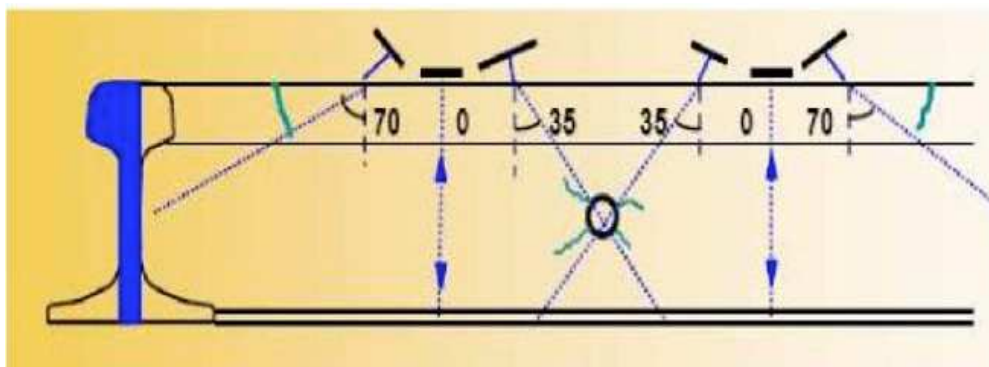
Ultrazvočne meritve tirnic kot neporušni postopek preiskave materiala se na Slovenskih železnicah izvajajo enkrat letno z ultrazvočnim merilnim vlakom UST 96.



Slika 40: Ultrazvočni merilni vlak UST 96

(Šemrov, 2012)

Povprečna hitrost UZ vlaka UST-96 znaša okoli 50 km/h, odvisna pa je seveda od dovoljene progovne hitrosti, stanja tirnic (bočna obraba) in vremenskih pogojev. Na merilnem vlaku so nameščene različne ultrazvočne glave (0° , $\pm 70^\circ$, $\pm 35^\circ$ in $\pm 70^\circ$ satelitske glave).



Slika 41: Normalna in kotna ultrazvočna glava

(Šemrov, 2012)

Kratki ultrazvočni valovi impulzi (majhne nihajne frekvence od 2 do 4 MHz) se iz preizkuševalnih glav pošiljajo v tirnico in po odboju na oviri (napaki) nato sprejemajo. Na ta način je mogoče zaznati vse nepravilnosti na razdalji, ki je enaka ali večja od 3 mm pod zgornjo površino tirnice. Za preprečevanje zračne reže med ultrazvočno glavo in preizkušancem (tirnico) se kot vezni del uporablja medij. Pretvorba električnih signalov v mehanske in obratno se zagotovi s pomočjo piezoelektričnega efekta v ultrazvočni glavi. Na SŽ se z vlakom UST 96 v povprečju letno zazna okoli 600 napak.

2.11 Brušenje tirnic

Zaradi napak na vozni površini tirnic je potrebno sprejemati določene ukrepe, s katerimi se te odpravljajo, saj lahko v nasprotnem primeru pride do prehitre potrebe po zamenjavi posameznih tirnic v tiru. Eden takšnih ukrepov je postopek brušenja tirnic, ki se je skozi desetletja razvijal in v sodobnem času postal učinkovit način, s katerim je možno odpraviti površinske napake na vozni površini tirnic in posledice obrabe.

2.11.1 Zgodovina brušenja

Brušenje tirnic se je najprej pojavilo v sredini 50. let v ZDA, pri čemer je bil proces brušenja v primerjavi s sedanjim bistveno enostavnejši. Značilnost takratnih tirnic je bila ta, da so bile izdelane iz nizkokarbonskega jekla (»mehke« tirnice), zato so bile bolj dovzetne za deformiranje. Oblika profila je bila dokaj ravna, stopnja obrabe pa izredno velika. Z brušenjem so odpravljali vidne površinske napake, kot so gube, razne odrgnine in nalepki. Večjega razmišljanja o prečnem profilu tirnične glave v začetku ni bilo, saj je bil takratni cilj narediti le gladko in ravno tekalno površino. V takratnih časih so bile velikosti tirnic, osni pritiski in tonaže v primerjavi z današnjimi časi bistveno manjše. Prav tako je bila tudi struktura proge bistveno bolj prožna.

V obdobju od leta 1950 do 1970 je prometni scenarij doživel velike spremembe. Količina prometa in osne obremenitve na progah so se močno povečale, temu pa takratne tirnice enostavno niso bile več kos, zato se je v sredini 70. let pričelo povpraševanje po novih tehnologijah proizvodnje tirnic, ki bi zagotavljale večje trdnosti, nosilnosti in manjšo obrabo. Ker se tirnice enostavno niso mogle upirati vse večjim obremenitvam, se je za podaljševanje življenjske dobe standardnih tirnic in za nadzor nad množičnim povečevanjem števila napak brušenje izvajalo vse pogosteje. Namesto tradicionalnega brušenja se je pojavila težnja po izdelavi brusnega profila tirnične glave skupaj z odpravo rebričenja.

Postopoma so se skupaj z naraščanjem prometa povečevale tudi osne obremenitve železniških prog. Namesto pričakovane povečane obrabe tirnične površine so se začeli kazati znaki utrujenosti materiala (odkrušeni delci, luščenje plasti, razpoke, zlomi). Praksa je pokazala, da so se kmalu po brušenju, ko je bila tirnica videti še »lepa«, na voznem robu začele pojavljati tanke razpoke (v obliki lasu), medtem ko so se na tekalni površini in delno tudi na voznem robu pojavljale majhne jamice (premera 1 mm), ki so bile izvor novih razpok. Sprva zanemarljive razpoke so se kmalu začele večati in številčno naraščati do te mere, da je bila potrebna menjava tirnic.

Kontaktne utrujenosti tirnic izhajajo običajno iz krhke, zelo trde materialne strukture imenovane martenzit. Ta vrsta utrujenosti v zgodnji fazi ni nevarna (dokler martenzitna plast ni tanjša od 0,02 mm), s časom pa na površini nastanejo razpoke, ki penetrirajo v mehkejše dele materiala. Problematika kontaktne utrujenosti je privedla do razvijanja metod merjenja in brušenja tirničnega profila (http://wiki.iricen.gov.in/doku/lib/exe/fetch.php?media=625:3rail_grinding.pdf (15.2.2013)).

2.11.2 Cilji brušenja tirnic

Brušenje tirnic je postopek vzdrževanja, ki se uporablja pri večini železniških uprav po svetu, da bi se podaljšale življenjske dobe tirnic. S postopkom brušenja tirnic se v tiru obnavlja površino in prečni profil glave tirnice (Zaletelj, Flerin, 2006). Na ta način se pri prevozu vlakov zmanjšajo dinamične obremenitve na tir, kar vpliva na povečanje pričakovane življenjske dobe tira, poleg tega pa se na ta način poveča udobje vožnje na račun zmanjšanja hrupa in vibracij. Z uporabo strojev, ki imajo nameščene brusne kolute, se z naklonskim spreminjanjem po tirnični glavi odstranjujejo različne površinske napake.

Cilji brušenja tirnic so sledeči (Zaletelj, Flerin, 2006):

- znižanje stroškov vzdrževanja tira (ciklusno obdobje strojnega podbijanja gramozne grede se podaljša za 30 do 60 %) in tirnih vozil,
- zmanjšanje vibracij in hrupa (dinamičnih obremenitev),
- povečanje udobja vožnje,
- zmanjšanje akustičnih emisij,
- zagotavljanje varnosti železniškega prometa,
- podaljšanje življenjske dobe tirnic.

S posebnimi napravami in tehnologijo je mogoče z brušenjem zmanjšati hrup pod predpisano vrednostjo, kar predstavlja edino rešitev na mestih, kjer vgradnja protihrupnih ograj ni mogoča. Z brušenjem je mogoče tirnice v tiru obnoviti do te mere, da zamenjava in ponovna vgradnja teh ni potrebna. Na ta način odpadejo vsi stroški izgradnje, vgradnje ter stroški transporta tirnic. Po Zaletelju in Flerinu (2006) se razmerje med stroškom brušenja tirnic in nakupom nove tirnice giblje med 1:10 do 1:15, odvisno za kakšen tip tirnice gre. Če pri tem upoštevamo še stroške za zamenjavo tirnice, in pozitivne lastnosti brušenja, ki vplivajo na daljšo obstojnost geometrija tira, gramozne grede in celotnega spodnjega ustroja, potem je razlika v razmerju stroškov še večja. Ob upoštevanju vseh ostalih faktorjev, bi bilo razmerje v korist brušenja še večje. Kljub temu pa brušenja ne moremo izvajati v nedogled, saj s tem tanjšamo debelino tirnične glave, zato je, ko presežemo dovoljeno toleranco potrebno tirnico zamenjati.

Velikokrat je preventivni ukrep vzdrževanja tudi brušenje tirnic v manjših obsegih, situacija pa se obvladuje tudi z uporabo trših tirnic R350HT na vseh odsekih, kjer so polmeri krožnih lokov manjši od 350 m. Z vidika ekonomičnosti je trend izvajanja več vzdrževalnih procesov v eni posamezni zapori. Med brušenjem tirnic se v času zapore tira, vzporedno izvajajo še druga vzdrževalna dela, kot

so košnja trave ob progi, popravila vozne mreže na elektrificiranih progah itd. (Zaletelj in Flerin, 2006).

2.11.3 Posledice valovitosti in obrabe

Pri tiru, kjer so na vozni površini prisotne neravnine, je znatno povečano dinamično delovanje vozila na tir. Navedene dodatne obremenitve vplivajo na pojav poškodb tirnega pribora (elementi pritrdjevanja tirnic, kape za povečanje bočnega odpora itd.), na popuščenje pritrdilnega materiala, na povečevanje stroškov vleke ter na geometrijo in spodnji ustroj tira. Stroški vzdrževanja takšnega tira so bistveno večji v primerjavi z vzdrževanjem tira brez prisotnosti neravnin na vozni površini (Marušić, 2009).

Posledice obrabe vozne površine tira občutijo tudi potniki na vlakih. Povečan hrup in vibracije, ki jih potniki v vagonih slišijo in občutijo, zmanjšujejo občutek lagodja. Resonanca je med večurnim potovanjem izredno moteča in lahko povzroči utrujenost ali celo slabost.

Valovita obraba vozne površine poveča nivo hrupa za naslednje vrednosti:

Preglednica 7: Vpliv obrabe na jakost hrupa

(http://www.mavthermit.hu/index.php?lang=hr_HR&oldid=2.7&product=86 (16.11.2012))

Jakost hrupa	Na progi brez valovite obrabe	Na valovito obrabljeni progi
Kupe na koncu vagona	58 dB	66 dB
Kupe na sredini vagona	51 dB	58 dB

Strojvodje se zaradi močnejših vibracij na obrabljeni progi lahko hitreje utrudijo. Delo pri takšnih pogojih ima negativne posledice, kot na primer zmanjšana sposobnost koncentracije, daljši odzivni čas, počasnejše zaznavanje signalnih oznak, kar seveda pomeni povečano tveganje. Tudi objekti v neposredni bližini železniških tirov so na udaru hrupa in vibracij, ki so posledica obrabljenosti proge. Induktivne vibracije železniške proge lahko povzročijo nihanje objekta ali dela objekta, kar lahko privede do škodljivih resonančnih pojavov.

Po daljšem obratovanju proge, postaja prerez tirnice vse bolj »ploščat«, material tirnične glave se bočno izboči. Izbočeni deli kovine se lomijo v nepravilnih oblikah. Nepravilna lomna površina je potencialna izhodiščna točka preloma tirnice. Takšno izbočenje proti osi tira zmanjšuje tirno širino. Tirnice pod vplivom prometa otrdijo, zatrdline pa povečujejo bočno izbočenje materiala. Trdota vozne površine tirnice je v simetrijski osi vedno manjša, kakor na robovih. Z reprofiliranjem tirnic, se lahko trdi robovi obrusijo. Na ta način se na »sploščeni« površini ponovno vzpostavi originalno krivuljo, medtem ko se kontaktna točka kolo-tirnica prestavi v simetrijsko os tirnice. Zunanje točke tirnice tako niso več obremenjene, poleg tega pa se zmanjša tudi prečno nihanje vozila (oscilacija) (http://www.mav-thermit.hu/index.php?lang=hr_HR&oldid=2.7&product=86 (16.11.2012)).

2.11.4 Strategije brušenja

Preden se načrtuje kakršnokoli vzdrževanje tirov s postopki brušenja je potrebno jasno določiti strategijo brušenja. Starost in stanje tirnic, kot tudi izkoriščenost linije, so običajno glavna merila pri določevanju strategije.

Poleg klasične uporabe brušenja tirnic za odstranjevanje površinskih napak, dobivajo vedno večji pomen še ostale vrste brušenja, in sicer (http://www.speno.ch/en/2_schleifstrategien.asp (15.12.2012)):

- brušenje novih tirnic,
- ciklično brušenje,
- preventivno brušenje,
- brušenje posebnih profilov.

2.11.4.1 Brušenje novih tirnic

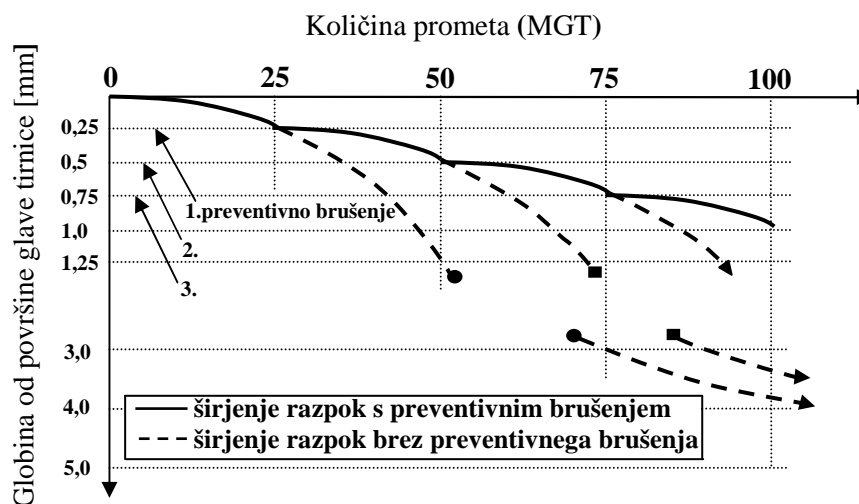
Brušenje novih tirnic je pomembno iz več razlogov. Na površini novih tirnic je namreč prisotna umazanija, ki je posledica valjanja, mogoč pa je tudi pojav manjših površinskih napak, ki so posledica proizvodnega procesa. To v primeru novih tirnic lahko povzroči hitrejšo rast deformacij na vozni površini, kar vodi do prezgodnje obrabe. Poleg tega se tanek površinski sloj novih tirnic med proizvodnjo dekarbonizira, posledica česar je manjša trdota zgornjega sloja, v primerjavi z globljimi sloji tirnice. Postopek eliminiranja zgoraj navedenih vplivov je brušenje novih tirnic še preden se po progi spusti promet. Z omenjenim postopkom se z vozne površine odstrani približno 0,3 mm sloja, s čimer se odpravijo tudi napake, ki so posledica obdelave površine zvarov v neprekinjeno zavarjenem tiru. Na ta način se podaljšajo intervali brušenja, saj pride do zakasnitve rasti napak v tirnicah. Brušenje novih tirnic naj bi se izvedlo najkasneje po 6 mesecih od vgradnje v tir (http://www.mav-thermit.hu/index.php?lang=hr_HR&oldid=2.7&product=86 (16.11.2012)).

2.11.4.2 Ciklično brušenje

Ciklično brušenje se izvaja, da se prepreči nastajanje vibracij na progi in da se razvoj kontaktne utrujenosti materiala, ki povzroča nastajanje napak, med katere štejemo predvsem površinske zarezne (head check), ohrani pod nadzorom. Omenjeni poseg se načrtuje v točno določenih intervalih, običajno po določeni prepeljani tonaži (npr. vsakih 20 MGT) ali pa glede na določene potrebe po zmanjšanju hrupa. Prav tako je priporočljivo izvesti brušenje zaradi zagotavljanja homogenosti metalurške strukture tirnic (http://www.speno.ch/en/2_zyklisch.asp (20.11.2012)).

2.11.4.3 Preventivno brušenje

Bistvo preventivnega brušenja je v tem, da se ta izvaja pred pojavom ali znatnim povečanjem obrabe tirnic. Z preventivnim brušenjem (manjšim številom brusnih hodov) se odstrani tanjši sloj s površine tirnic, s čimer se prepreči nadaljnji razvoj napak na vozni površini (graf 3). Iz grafa je razvidno, da napake na začetku rastejo počasneje, kasneje pa se njihova rast v odvisnosti od količine prometa bistveno hitreje povečuje. Z preventivnim brušenjem se na tirnicah spet vzpostavi prvotno stanje. Skozi daljše časovno obdobje je izvedeno redno letno preventivno brušenje ekonomsko bolj sprejemljivo kot občasno brušenje vsakih nekaj let že deformiranega profila vozne površine tirnic (http://www.mav-thermit.hu/index.php?lang=hr_HR&oldid=2.7&product=86 (20.11.2012)).



Graf 3: Vpliv preventivnega brušenja na rast in razvoj napak na vozni površini tirnice

(http://www.arena.org/files/library/2003_Conference_Proceedings/0062.pdf (28.11.2012))

2.11.4.4 Brušenje posebnih profilov

Tehnika brušenja posebnih profilov zajema preoblikovanje glave tirnice v profil ali obliko, ki se razlikuje od prvotnega (originalnega) profila in je zasnovan zaradi reduciranja določenih vrst napak, ki zadevajo tirnično glavo, kot so luščenje, valovitost in obraba. Brušenje posebnega profila je proces, ki je sestavljen iz treh faz, in sicer (http://wiki.iricen.gov.in/doku/lib/exe/fetch.php?media=625:rail_grinding.pdf (15.12.2013)):

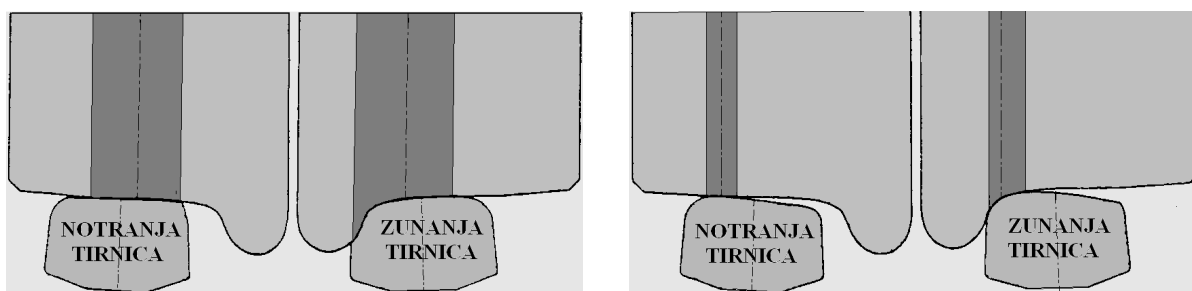
1. faza: izvede se enega ali več hodov brušenja, da se odpravi napake na površini tirnice,
2. faza: izvede se več hodov brušenja, da se reprofilira deformirano glavo tirnice,
3. faza: izvedejo se končni hodi brušenja, da se doseže končni profil tirnice.

Glavni namen brušenja posebnega profila je kontrolirati tri vrste napak, ki se generirajo na tirnici in so posledica interakcijskih sil med kolesom in tirnico. Posamezna vrsta profila je namenjena kontroli točno določene vrste napake. Dominantnost posamezne napake na določeni lokaciji dejansko določa vrsto profila, ki ga je potrebno zagotoviti s postopkom brušenja. Danes obstaja več vrst tako imenovanih posebnih asimetričnih profilov, kot na primer (Schoech, Grinding specific profiles):

- profili za zmanjšanje obrabe (ang. ant-wear profile) za reduciranje bočne obrabe zunanjih tirnic v krivinah z manjšimi polmeri,
- profili za zmanjšanje kontaktnega utrujanja (ang. anti-headcheck profile) na voznem robu zunanjih tirnic v krožnih lokih z večjimi polmeri,
- posebni profili za visoke hitrosti in še nekateri drugi.

V nadaljevanju je predstavljen profil za zmanjšanje obrabe.

Posebni asimetrični tirnični profil (angl. anti-wear profile) pozitivno vpliva na zmanjšanje obrabe in sil v krožnih lokih. Prvi poskusi asimetričnega brušenja tirnic so bili izvedeni v Avstriji leta 1985. Geometriji asimetričnega profila notranje in zunanje tirnice v krivini sta različni in zasnovani tako, da se položaj kontaktne cone na zunanji tirnici premakne nekoliko bolj proti notranjemu vertikalnemu robu tirnice, medtem ko se položaj kontaktne cone na notranji tirnici premakne bolj proti zunanjemu robu tirnice (slika 42). To se doseže z odstranjevanjem tirničnega materiala na posameznem delu glave tirnice (slika 42, desno). Poleg tega je površina kontaktne cone med kolesom in tirnico manjša v primerjavi s standardnim profilom. Redukcija obrabe in sil v krivini se doseže z vzpostavitvijo enotočkovnega kontakta med tirnico in kolesom. Pri tirnih vozilih z nizko osno obremenitvijo je takšen ukrep izredno ugoden. Toda pri težjih osnih obremenitvah lahko prihaja na kontaktni točki kolesa in tirnice (zaradi zmanjšane kontaktne površine) do izrednega porasta kontaktnih napetosti. Takšni presežki kontaktnih napetosti lahko generirajo napake, povezane s kontaktnim utrujanjem materiala (Schoech, Grinding specific profiles).



Slika 42: Standardni profil (levo), asimetrični profil proti obrabi (desno)

(<http://www.speno.ch/pdf/RailwayEngineering2007.pdf> (2.12.2012))

Ekonomske prednosti postopka se kažejo v tem, da se posebno profiliranje zunanje tirnice vedno izvaja sočasno z odstranjevanjem valovitosti na notranji tirnici, brez kakršnegakoli dodatnega dela in časa. Zaradi reduciranja obrabe so mejne vrednosti dosežene bistveno kasneje. Življenjska doba tirnic se na ta način podaljša za več kot 50 % (Schoech, Grinding specific profiles).

2.11.5 Brušenje z brusilno garnituro SPENO

Na progah SŽ se v zadnjih letih vzdolžna valovitost tirnic in napake prečnega profila odpravljajo z brusilnim vlakom Speno RR24M-14. V okviru rednega vzdrževanja prog se brušenje izvaja enkrat letno. Koliko kilometrov proge je mogoče pobrusiti na dan, je odvisno od časa trajanja zapore, stanja tirnic in števila signalnovarnostnih in drugih naprav, ki jih je treba med zaporo pred brušenjem odstraniti, po brušenju pa ponovno namestiti. Glede na to, da je brušenje tirnic specifičen tehnološki proces dela, ki zahteva izvedbo brušenja daljših medpostajnih odsekov v času ozko odmerjenih zapor tirov zaradi minimalnih ovir pri odvijanju z voznim redom planiranega potniškega in tovornega prometa ter upoštevajoč predhodno obdelavo podatkov meritev, ki služijo za planiranje odsekov reprofiliranja-brušenja tirnic, je po podatkih SŽ s tehničnega vidika edini ponudnik podjetje SPENO International SA.

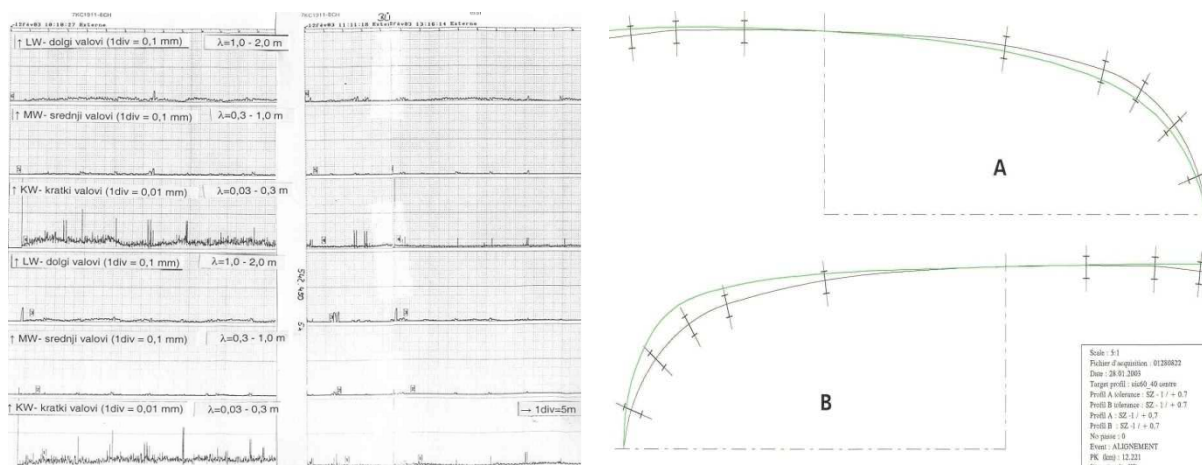


Slika 43: Brusilni vlak Speno RR24M14 med procesom brušenja tirnic

(Flerin, 2012, str. 2)

Brusilni vlak Speno RR24M-14 ima nameščenih 24 brusnih kolutov premera 250 mm, in sicer po 12 na vsaki strani. Trije sklopi z štirimi brusnimi koluti na vsaki strani posameznega vagona delujejo v različnem delovnem območju ($+20^{\circ} / -15^{\circ}$, $+20^{\circ} / -50^{\circ}$, $0^{\circ} / -70^{\circ}$). Vseh 24 brusnih kolutov se med procesom brušenja računalniško krmili (naklon, pritisk, vrtljaji). Število hodov brušenja je odvisno od stanja tirnic (prečnega profila in valovitosti) in se v povprečju giblje med 6-8, pri čemer se v temenu krivine največkrat dodatno izvede še 1-2 hoda brušenja. Po zadnjem hodu brušenja tirnic se doseže hrapavost v povprečju 13 μm , amplitude kratkih valov okoli 0,02, prečni profil tirnice pa se reprofilira znotraj tolerančnega območja $+0,7 \text{ mm} / -1,0 \text{ mm}$ (preglednica 8). Delovna hitrost brušenja je odvisna od stopnje obrabe tirnic in znaša približno 4–6 km/h, kar učinkovito pomeni približno 4.000–6.000 m pobrušenih odsekov prog dnevno. Stroj RR24M-14 s svojim načinom, tehnologijo, kapaciteto dela in fleksibilnostjo zagotavlja dejansko minimalne ovire v prometu (Flerin, 2012).

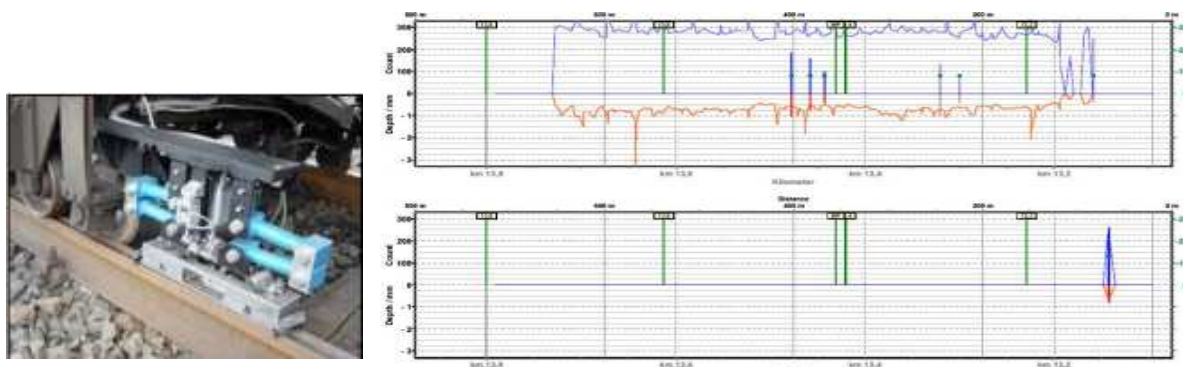
Med procesom brušenja se vzporedno izvajajo kontrolne meritve prečnega profila leve in desne tirnice, in sicer s pomočjo laserskega merilnega sistema (slika 44 desno), meritve dolgih ($\lambda = 1.0\text{--}2.0$ m), srednjih ($\lambda = 0.3\text{--}1.0$ m) in kratkih valov ($\lambda = 0.03\text{--}0.3$ m) leve in desne tirnice s pomočjo kontaktnih piezoelektričnih senzorjev (slika 44 levo) ter meritve globine napak na površini tirnice oziroma »head check« napak preko ultrazvočnih naprav (Flerin, 2012).



Slika 44: Diagram meritev med procesom brušenja tirnic

(Flerin, str. 4)

Merjenje globine površinskih napak omogoča posebna ultrazvočna naprava (angl. HC-Grinding Scanner), ki je nameščena na brusilnem vlakcu (slika 45). Določanje globine in položaja površinskih napak na prečnem profilu je ključnega pomena za izvedbo učinkovitega in racionalnega brušenja. Sistem sproti meri in shranjuje podatke o meritvah, tako da je potem možno primerjati stanje pred in po brušenju.



Slika 45: Ultrazvočna naprava na brusilnem vlakcu (levo), prikaz meritev (desno)

(<http://www.speno.ch/pdf/HC%20Grinding%20Scanner%20eng%20v1.pdf> (19.3.2013))

Preglednica 8: Tolerančna območja pri brušenju tirnic (Katalog der wichtigsten Schienenfehler in Gleisen und Weichen)

Hitrost vlakov	Tip tirnice	Kratki valovi	Profil	Hrapavost
< 140 km/h	60 E1 1:20	0.02 mm	+0.7/-1.0 mm	13 µm
< 140 km/h	49 E1-54E1 1:20	0.02 mm	+0.5/-0.3 mm	13 µm

2.11.6 Visokohitrostno brušenje »HSG«

Visokohitrostno brušenje oziroma HSG (angl. High Speed Grinding) je nova tehnologija preventivnega brušenja, ki temelji na hitrostih, ki presegajo 80 km/h. Zaradi tega takšen postopek brušenja ne ovira ostalega prometa, zato zapore tira niso potrebne. HSG omogoča odpravo površinskih napak, ki so posledica kontaktnega utrujanja materiala in obrabe. Na ta način se življenjska doba tirnic bistveno poveča.



Slika 46: Brusilni vlak podjetja Vossloh za visokohitrostno brušenje

(<http://www.vossloh.com> (23.2.2013))

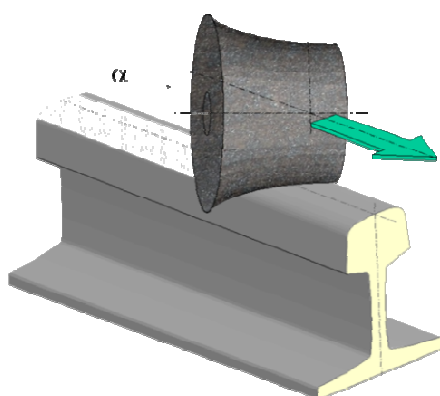
Področja uporabe HSG:

(<http://www.vossloh-rail-services.com/media/en/downloads/pdfs/prospekte/.pdf> (23.2.2013))

- Preventivno brušenje, s katerim se preprečuje razvoj kontaktne utrujenosti materiala, in dosledno izboljša vzdolžni profil tirnic. Najučinkovitejši in stroškovno ugoden način za preprečevanje nastanka napak, ki so posledica kontaktne utrujenosti materiala je namreč njihovo odstranjevanje v zgodnji fazi razvoja. To se najbolje doseže z odstranitvijo utrujenega površinskega sloja na tirnici, ki je osnova za nastanek napak, med katerimi so najpogostejše »head check« napake. Periodično odstranjevanje 0,1 mm debelega površinskega sloja z uporabo HSG je dovolj za preprečitev razvoja napak.

- Brušenje novih tirnic, pri čemer se odstrani 0,2–0,3 mm materiala, kar vpliva na zakasnitev razvoja rebričenja ter ostalih napak na vozni površini tirnic in omogoča odstranitev napak, ki so morebiti nastale med vgradnjo tirnic in ostalih gradbenih del. Začetno brušenje novih tirnic vključuje 5–6 hodov, pri čemer ni potrebna odstranitev komponent tira kot pri klasičnem brušenju, kar pripomore k prihranku časa in denarja.
- Akustično brušenje, s čimer se ohranja vozno površino gladko, kar bistveno vpliva na zmanjšanje jakosti hrupa in na zmanjšanje valovitosti vozne površine. Postopek je stroškovno učinkovit in okolju prijazen.
- Odstranjevanje nizko-trenjskih premazov na površini tirnic.

HSG temelji na številnih rotirajočih brusih, ki so postavljeni diagonalno glede na tir (slika 47). Za vrtenje brusov ni potreben motorni pogon, medtem ko se pritisnitev brusov ob vozno površino tirnice izvede hidravlično. Odstranitev 0,1 mm debelega sloja materiala se običajno doseže s tremi brusnimi hodi (dva groba prehoda in gladek prehod).



Slika 47: Lega brusnih kamnov

(http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prinzip_High_Speed_Grinding.png (23.2.2013))

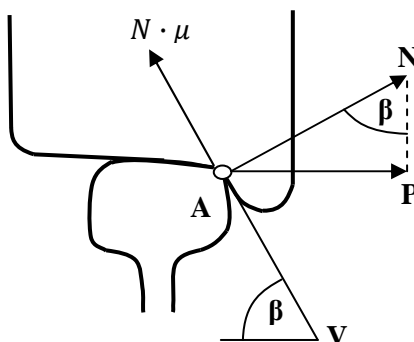
Prednosti tehnologije HSG v primerjavi s klasičnimi postopki brušenja so predvsem:

- brušenje brez potrebne zapore tira,
- odstranjevanje signalnih in ostalih tirnih naprav, ni potrebno,
- prijaznost do okolja (vakuumsko zajemanje prahu in jeklenih opilkov med brušenjem),
- poškodbe tirnic zaradi pregretja niso možne,
- zaradi visoke zmogljivosti zajemanja prahu in filtracijskega sistema je možno brušenje tudi v tunelih,
- hitrost prehoda preko kretnic se ne spreminja in je enaka hitrosti brušenja.

2.12 Mazalne naprave

Pomemben ukrep za zmanjšanje obrabe tirnic je poleg vgradnje tirnic višjih trdot tudi vgrajevanje mazalnih sistemov, ki z nanašanjem maziva na tirnice zmanjšujejo trenje med kolesom tirnega vozila in tirnico ter na ta način zmanjšujejo obrabo. Nasplošno sta v vseh relevantnih LCC (angl. Life Cycle Cost) modelih mazanje in brušenje tirnic najučinkovitejši orodji za vzdrževanje tirnic.

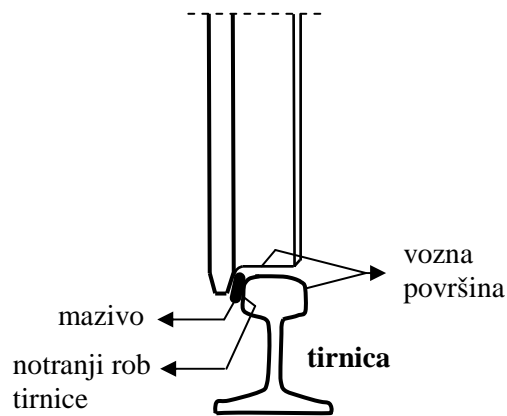
Sile, s katerimi kolo tirnega vozila deluje na zunanjo tirnico v krivini, povzročajo tako obrabo tirnice kot tudi obrabo kolesa. Na sliki 48 je z N označena normalna sila kolesnega venca, z $N \cdot \mu$ pa je označen odpor trenja kolesnega venca, pri čemer je μ koeficient trenja (Milojković, 1986).



Slika 48: Sile, s katerimi kolo vozila deluje na tirnico v krivini

(Milojković, 1986, str. 48)

Z zmanjševanjem koeficienta trenja μ se zmanjšuje tudi bočna obraba glave tirnice, zato je potrebno redno mazanje notranjega vertikalnega roba glave zunanje tirnice v krivini (slika 49). Maže se torej vedno notranji rob tirnične glave, ki je v kontaktu s sledilnimi venci kolesnih obročev (Milojković, 1986). Mazanje tirnic, enako kot brušenje, močno zmanjša stroške življenjskega cikla (LCC), povečuje pa zanesljivost, razpoložljivost, vzdržljivost in varnost v železniškem prometu. S kakovostnim mazanjem bistveno podaljšamo čas med brusilnimi cikli in prav za toliko tudi življenjsko dobo tirnice (lahko celo do dvakrat, odvisno od kvalitete tirnice, kvalitete mazanja in polmera krožnega loka), poleg tega pa so ekvivalentni učinki tudi na strani koles .



Slika 49: Območje nanosa maziva

Mazanje tirnic se izvaja s specialnimi mazivi in sicer ročno ali avtomatsko. Avtomatsko mazanje tirnic se lahko izvaja na dva načina in sicer preko mazalnih sistemov, ki so nameščeni na vlečnih vozilih t.j. lokomotivah in se vključujejo avtomatsko ob vstopu vozila v krivino, ali pa se pred vstopom v krivino vgradijo stacionarne mazalne naprave, ki se pri prehodu tirnega vozila avtomatsko aktivirajo (Milojković, 1986). Na tem mestu je potrebno omeniti, da je smiselnost vgradnje stacionarnih mazalnih naprav, kljub na lokomotivah že vgrajenimi napravami za mazanje kolesnih vencev, vsekakor na mestu. Tako imenovani »on board« mazalni sistemi danes porabijo osem kilogramov maziv na deset tisoč prevoženih kilometrov, kar pa nikakor ni dovolj za ekonomično vzdrževanje tirnic (Kostiov, 2009).

Bistvo tirnih mazalk je torej znižanje trenja med tirnico in kolesnim vencem vlečnega vozila in vagonov, s tem pa se močno zmanjša obraba tirnice in posledično kolesnega venca. Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010) določa, da je nanašanje maziva na zgornjo površino tirnične glave prepovedano, saj bi v tem primeru zaradi zmanjšanja adhezije lahko prišlo do slabenja vlečne sile in zdrsavanja pogonskih koles lokomotive. Stabilne tirne mazalke mažejo sledilne vence koles vozila, ki nato mazivo raznašajo v smeri vožnje na zunanje tirnice istosmernih krivin. Dolžina uspešnega mazanja je odvisna od števila in dolžine krivine ter od nastavitve mazalke.

2.12.1 Sistemi za mazanje tirnic

Sisteme za mazanje tirnic lahko razdelimo na nekoliko starejše mehanske in na modernejše multiaktivne mazalne sisteme, ki so danes v uporabi. Mehanske mazalne naprave se danes praktično ne uporabljajo več, saj so ti sistemi zastareli in ne ustrezajo več vse večjim zahtevam po manjši obrabi tirnic, manjših emisijam hrupa, večji prijaznosti do okolja itd. Danes v ospredje vse bolj prihajajo novi sistemi za mazanje tirnic z lastnimi viri energije. Razvoj v tej smeri prinaša na področju mazanja številne prednosti tako na področju primarnih funkciji (mazanje), kot tudi na področju racionalnosti in prijaznosti do okolja.

2.12.1.1 Mehanske mazalne naprave

Stara mazalne naprave, ki dozirajo mazivo preko mehanskega nastavka, ki ga kolo prevozi, so danes praktično dotrajane in se jih s pridom nadomešča z novimi. Poleg tega tovrstnih mazalnih naprav ni mogoče več vzdrževati, saj rezervnih delov ni več na razpolago, poleg tega so izredno nezanesljive, saj se dozirna polja pogosto zamaščujejo in mašijo, problematično pa je tudi delovanje pri nižjih temperaturah, ko mazivo postane manj viskozno.



Slika 50: Primer starejše mazalne naprave

<http://www.vlaki.info/forum/viewtopic.php?t=3939> (10.3.2013))

Zaradi nenehnih težav z obstoječimi mazalnimi napravami, vgrajenimi v proge Slovenskih železnic, (v nadaljevanju SŽ) je prišlo do začetnih razmišljanj glede razvoja novih mazalnih naprav, kot je nova mazalna naprava za mazanje tirnic CL-E1 proizvajalca Elpa, d.o.o. Cilj SŽ je vsekakor zamenjati stare, preživete in za vzdrževanje drage naprave z modernimi, učinkovitimi, zanesljivimi in okolju prijaznimi napravami, s katerimi se istočasno doseže manjšo obrabo, zmanjšanje hrupa in daljšo življenjsko dobo tirnic ter manjše stroške vzdrževanja (Kostiov, 2009).

2.12.1.2 *Moderne mazalne naprave*

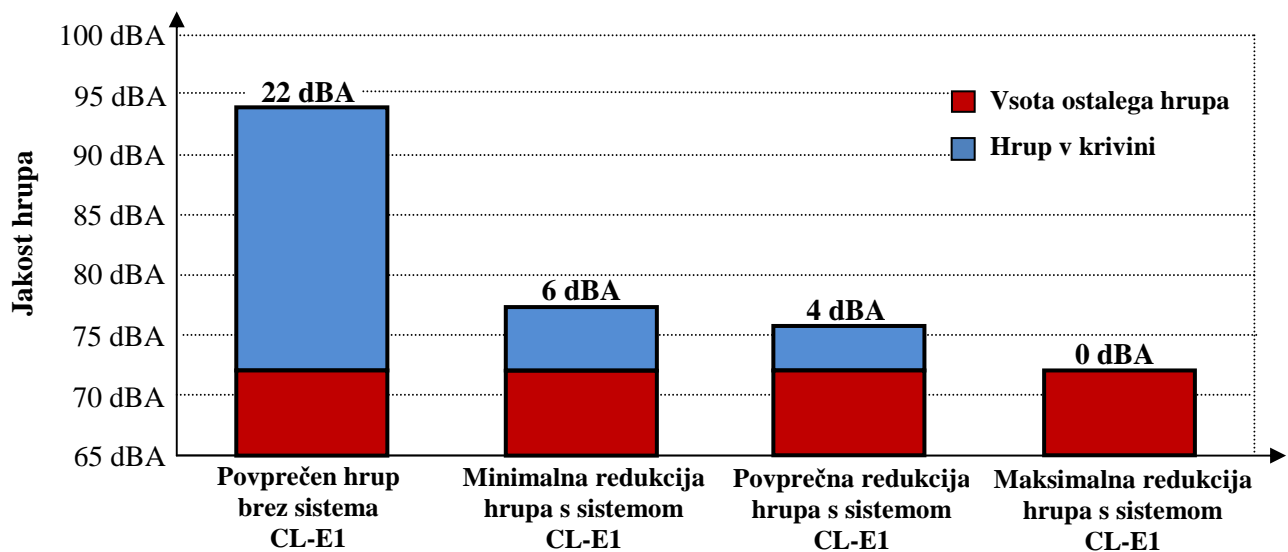
Prednost mazalne naprave tipa CL-E1, ki se v zadnjih letih vgrajuje na proge (SŽ), je predvsem ta, da je že v fazi prototipa prekašala tehnološke rešitve, ki jih je ponujala konkurenca, kot na primer brezkontaktno tipanje koles, tipanje smeri vožnje, neodvisno oskrbo z energijo z uporabo sončnih celic, uporabo okolju prijaznih CHFC (težko fluidne kompozitne zmesi) maziv in montažo zunaj nevarnega območja, kar omogoča enostavno ravnanje z njo (Kostiov, 2009).



Slika 51: CL-E1 mazalna naprava na Slovaškem

(Nova proga, 2009, str. 20)

Testna naprava, ki se je leta 2001 tudi vgradila na progo SŽ, se je do danes izkazala kot brezhibna. Uporaba mazalne naprave CL-E1 je pokazala zelo dobre rezultate, tako v svoji primarni funkciji (mazanje kontakta kolo-tirnica) kot tudi na področju vzdrževanja (stroški vzdrževanja so praktično zanemarljivi), sama poraba maziva pa je nadzorovana in racionalna. Na obremenjenih glavnih progah znaša poraba maziva 5 kg na mesec. Izpostaviti je potrebno tudi učinkovitost naprave na področju sanacije hrupa (graf 4) in zmanjšanju obrabe tirnic. CL-E1 omogoča uporabo zelo zahtevnih mazalnih medijev, ki med drugim vsebujejo tudi Al, ki je dokazano najboljši material za preprečevanje kotalno kontaktnega utrujanja (RCF) in pokanja notranjega roba tirnice (GCC) .



Graf 4: Reduciranje hrupa v krivini z sistemom CL-E1. Meritve so bile izvedene na oddaljenosti 9,5 m od proge pri frekvenci 12.500 Hz
(www.elpa.si (23.11.2012))

Z uporabo multiaktivne oskrbovalne naprave CL-E1 zgolj na najbolj obremenjenih delih prog, znaša minimalni prihranek, izračunan na podlagi relevantnih podatkov na SŽ, 500.000 evrov letno. Nezanemarljiv pa je tudi okoljski vidik, in sicer zmanjšanje emisij jeklenih opilkov v naravno okolje (za približno 1500 kg zmanjšana emisija jeklenih opilkov na eno samo oskrbovano krivino na leto v območje proge). Gre torej za velike ekonomske in ekološke učinke na dolgi rok (Kostiov, 2009).

Naprava CL-E1 je sestavljena iz sledečih delov:

- agragata,
- dozirnega seta (slika 52),
- solarnega sistema z elektro omarico.

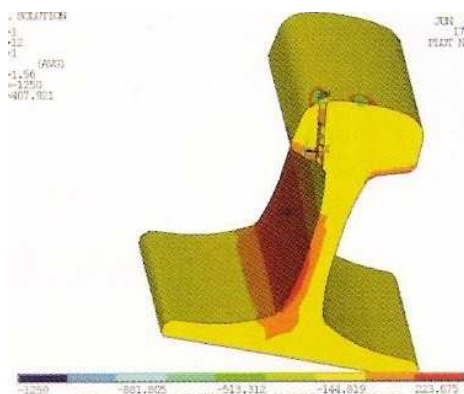


Slika 52: CL-E1 dozirno polje na progi Celje-Maribor z vidnimi dozirnimi vrtnami

(Nova proga, 2009, str. 20)

Agregat in solarni sistem sta zaradi lažjega in varnejšega vzdrževanja ter oskrbovanja agregata z kompozitno zmesjo nameščena na primerni oddaljenosti od tirov, medtem ko sta dozirni set in senzor nameščena neposredno na tirnico. Možna je tudi vgradnja agregata pod zemljo.

Princip delovanja multiaktivne oskrbovalne naprave CL-E1 je zasnovan na elektro-mehanskem principu. Prehod vlaka aktivira senzor, ki lahko po potrebi zazna tudi smer vožnje vlaka, kar omogoča racionalnejšo porabo maziva, saj so tirnice oskrbljene le v eni smeri (na primer iz preme v krivino, obratno pa ne). Krmilno vezje vključi agregat, ki začne mazivo dovajati do dozirnega mesta po visokotlačnih ceveh. Interval nanašanja je ciklični in običajno traja 5 sekund. Po prehodu 5 s cikla, prehod naslednjega kolesa zopet sproži nanašalni cikel. To pomeni, da je število ciklov nanašanja odvisno od dolžine kompozicije in hitrosti vlaka. Način doziranja je možen preko nanašalnih nožev ali pa skozi dozirne odprtine izvrtine (slika 53).



Slika 53: Tirnica z dozirno izvrtino

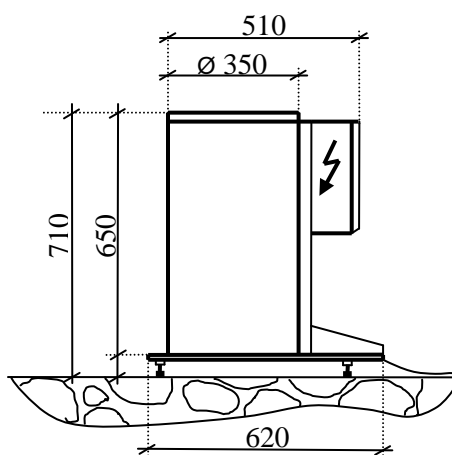
(www.elpa.si (23.11.2012))

Učinkovit sistem omogoča dovajanje posebnega CHFC-maziva, ki vsebuje več kot 40 % trdnih delcev. Omenjeni material je sposoben prevzeti izjemno visoke tlačne obremenitve. Patentiran in verificiran način doziranja skozi dozirne izvrtine v glavi tirnice omogoča znatno znižanje jakosti hrupa in zelo majhno porabo CHFC-maziva. Poleg tega je tak sistem izredno varen, saj ni potrebna montaža dodatnih elementov ob tirno glavo, ki bi bili zaradi vse višjih hitrosti vlakov izpostavljeni nevarnosti zloma, poleg tega pa na ta način izničimo tudi nevarnost poškodbe kolesnih vencev. Dozirno polje je lahko sestavljeno iz ene ali več dozirnih izvrtin, ki so lahko pozicionirane v isti liniji in na enaki višini tirne glave, odvisno seveda od zelenih oziroma zahtevanih učinkov. Dozirna količina maziva znaša od $0.01 \text{ cm}^3/\text{s}$ do $0.18 \text{ cm}^3/\text{s}$. Minimalno količino maziva v rezervoarju signalizira rdeča lučka na rezervoarju. Elektronika naprave CL-E1 omogoča tudi štetje aktivnih osi preko dozirnega polja.

Tehnični podatki:

- volumen rezervoarja: $V = 24 \text{ dm}^3$,
- masa praznega agregata: $m = 35 \text{ kg}$,
- število dozirnih elementov: $X = 1-6$,
- operativna voltaža: $U = 24 \text{ V DC}$,
- max. jakost toka: $I_{\text{max}} = 2 \text{ A}$.

Dimenzije:



Slika 54: Dimenzije naprave CL-E1

(www.elpa.si (23.11.2012))

2.12.2 Vgrajevanje mazalnih naprav

Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010) določa, da je potrebno tirnice obvezno mazati v krivinah s polmerom $R \leq 600 \text{ m}$, če je promet večji od 1,5 milijona brt/letno, v ostalih primerih pa po potrebi. Na dvotirni progi, kjer ni dvosmernega prometa, se mazalna naprava vgrajuje v prehodnici pred krožnim lokom z radijem $R \leq 600 \text{ m}$. Na enotirni in dvotirni progi z obojestranskim prometom se vgrajuje v sredini loka. Montira se po specifikaciji proizvajalca. Pri naročilu mazalne naprave je potrebno navesti sistem tirnice, ob kateri se bo naprava vgradila, poleg tega pa se v zvezi z napravo vodi tudi evidenca ki zajema zaporedno in tovarniško številko mazalke, odsek proge ali tira, kilometrsko mesto vgraditve, tirni trak, datum montaže, datum pregleda ter datum polnjenja in izmenjave posameznih delov. Uspešnost mazanja tirnic se prikazuje s pomočjo analize na podlagi evidence meritev obrabe tirnic in se nato na podlagi rezultatov izvaja morebitne dodatne ukrepe.

3 VARJENJE TIRNIC IN NEPREKINJENO ZAVARJENI TIR

Varjenje lahko definiramo kot spajanje materiala v nerazdružljiv spoj kovinskih in nekovinskih gradiv, pri čemer so lahko gradiva istovrstna ali različna. Spoji so lahko nosilni ali tesnilni in morajo zato obdržati enake mehanske lastnosti, kot jih ima osnovni material. Pri varjenju vedno prihaja do nekega vpliva na material na določenem področju, zato se v tem delu varjencu menja struktura, sestava in mehanske lastnosti materiala. S tem, ko se material med varjenjem neenakomerno segreva in ohlaja, nastajajo notranje napetosti in deformacije. Sposobnost varjenja je v prvi vrsti fizikalna karakteristika materiala, ki je prisotna, kadar lahko na podlagi kemičnih, mehanskih in fizikalnih lastnosti materiala izvedemo zvarni spoj glede na postavljene zahteve. Sposobnost varjenja je odvisna od (Flerin, 2004):

- kemične sestave materiala,
- metalurških lastnosti, ki so pogojene z izdelovalnim postopkom materiala,
- fizikalnih lastnosti materiala.

Cilji varilnih postopkov na zgornjem ustroju železniške proge so (Flerin, 2004):

- povečanje udobja vožnje,
- zmanjšanje obrabe kolesa in tirnice,
- povečanje tekalne sposobnosti vozil,
- zmanjšanje stroškov vzdrževanja vozil in vleke,
- povečanje varnosti,
- povečanje voznoredne hitrosti,
- zmanjšanje hrupa, ki ga povzroča relacija med kolesnim vencem in tirnico.

Postopki varjenja tirnic so sledeči (Marušić, 2009):

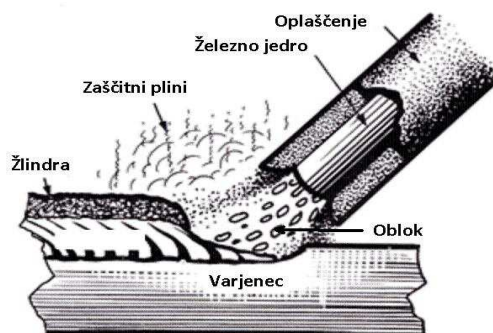
- elektroobločno varjenje,
- elektroporovno varjenje,
- avtogeno varjenje,
- aluminotermijsko varjenje.

Elektroobločni in avtogeni oziroma plinski postopek varjenja se uporabljata predvsem za odpravljanje napak na tirnicah in kretnicah s tako imenovanim navarjanjem postopkom navarjanja.

Popravila poškodovanih delov tirnic in kretniških src s postopkom navarjanja (nanašanjem materiala) je standardna metoda vzdrževanja tirnic v svetu. Sanacija poškodb z navarjanjem je bistveno cenejša od zamenjave poškodovanih delov tirnic, poleg tega je možno s takšnim vzdrževanjem bistveno

podaljšati življenjsko dobo tirnic. Stroški navarjanja kretnic, ki so izpostavljene intenzivni obrabi, znašajo približno 20 % vrednosti stroškov, ki bi nastali pri njihovi zamenjavi z novimi (Popović idr, 2006).

Elektroobložno varjenje se dolgo ni moglo uveljaviti, ker je tirnično jeklo vsebovalo preveč ogljika. Šele z uvedbo primernih elektrod so se možnosti uspešnega uveljavljanja varilnega postopka povečale (Gspan, 1962). Elektroobložni postopek varjenja se največkrat uporablja za navarjanje tirnic, kar je iz ekonomskega vidika posebej ugodno pri odpravljanju napak v neprekinjeno zavarjenem tiru, saj na ta način rezanje in odstranjevanje poškodovanih delov tirnic ni potrebno. Postopek temelji na približevanju elektrod, ki so pod napetostjo in ustvarjajo električni oblok k varjencu. Raztopljeni kovinski deli, ki jih oblok tali, se odtaljujejo v var in na ta način zapolnijo zvarno rego. Oplaščenje elektrod lajša in stabilizira gorenje obloka, legira in dezoksidira var, poleg tega pa tvori tudi žindra, ki dodatno ščiti var pred atmosfero in upočasnjuje ohlajanje zvara. Kvaliteta zvara je v največji meri odvisna od usposobljenosti varilca (Gspan, 1962).



Slika 55: Elektroobložni postopek varjenja tirnic

(http://sl.wikipedia.org/wiki/Ro%C4%8Dno_oblo%C4%8Dno_varjenje (3.4.2013))

Za avtogeno varjenje ni potrebna električna energija, temveč samo plamenski gorilnik. Postopek je torej energetske neodvisen (avtogen). S pomočjo plamena iz gorilnika, se material iz varilne žice, ki je sestavljena iz visokovrednega jekla, odtaljuje v zvarno rego. Tirnico je potrebno na mestu, kjer se vrši navarjanje, predhodno segreti na temperaturo 900 °C. Kvaliteta zvara je v veliki meri odvisna od usposobljenosti varilca. Kakovost zvara v večini primerov zaostaja za kakovostjo, ki jo dosegajo sodobnejši postopki (Milojković, 1986).

Elektrotoprovni in alumotermijski postopek se uporabljata za vzdolžno povezovanje tirnic v neprekinjeno zavarjeni tir.

Kot razlaga Marušič (2009) je elektroporovno varjenje najhitrejši in najkvalitetnejši postopek varjenja tirnic. Izvaja se v proizvodnih obratih, saj zahteva uporabo masivne in težke opreme za izvajanje zvarov. Po tem, ko se oba konca tirnic primerno očisti, se jih vpne v dve elektrodi varilnega stroja. Ko se sklene električni krog nizke napetosti 5–10 V in jakosti 25.000 A, prične stroj sukcesivno stiskati in odmikati čeli tirnic, pri čemer se ploskvi segrevata in ko sta segreti na primerno temperaturo, jih stroj pod pritiskom stisne skupaj. Celoten proces varjenja traja 2–3 minute, zvar pa odraža odlična kvaliteta, poleg tega pa je čas priprave in izvedbe zvara izredno kratek. Takšnega zvara po končanem postopku praktično ni mogoče opaziti. Slaba stran je povezana z velikimi investicijskimi stroški opreme in dejstvom, da se takšno varjenje lahko izvaja le v specializiranih obratih (Milojković, 1986).



Slika 56: Naprava za elektroporovno varjenje tirnic

(<http://image.made-in-china.com/4f0j00VCLElgZhaWui/Flash-Butt-Welding-Machine-for-Rails.jpg> (1.4.2013))

Za izvedbo zvarov primerljivih kakovosti neposredno na gradbišču, se danes uporablja tudi tako imenovano mobilno elektroporovno varjenje. Mobilne naprave za elektroporovno varjenje so nameščene na tirna vozila in so tehnično in ekonomsko izredno dobra rešitev, z visoko stopnjo fleksibilnosti in kakovosti. Celoten proces je avtomatiziran. Varilni cikel zajema vpenjanje, centriranje, varjenje in obrez varilne žmule .



Slika 57: Naprava za mobilno elektroporovno varjenje

(<http://www.schlatter.ch/zh/schweissanlagen/downloads/> (24.4.2013))

Alumotermijsko varjenje (v nadaljevanju AT) spada med najbolj uveljavljene postopke za varjenje tirnic, kar dokazuje obseg njegove uporabe na železnicah. V Evropi je približno 80 % tirnih spojev zavarjenih po AT-postopku, pri nas pa v zadnjih letih praktično 100 % (Zabukovec idr., 2003).

Prednost AT-postopka je predvsem neodvisnost glede na potrebno energijo za varjenje, mobilnost ekip ter možnost varjenja in umika v premorih med vlaki (Štefotič, 1970). Za železnice je takšen način izvedbe zvarov zelo uporaben, ker na progi običajno ni izvora energije. Postopek je relativno enostaven in hiter, z relativno preprosto opremo. Čas, potreben za izvedbo, je približno 20 min, če pa pri tem upoštevamo še čas ohlajanja zvara, da je le-ta zmožen prenašati obtežbe vozil, znaša trajanje zapore tira približno 70 minut (Zabukovec idr., 2003). Poleg tega je AT-postopek v primerjavi z ostalimi varilnimi postopki tudi cenovno ugodnejši. Cena enega AT-zvara znaša v praksi skupaj z izvedbo in materialom približno 200 EUR. Za izvedbo enega zvara je potrebna skupina treh delavcev.

Največja pomanjkljivost AT-zvara je v tem, da se ta izvaja s procesom litja, medtem ko se tirnica proizvaja z valjanjem. Tudi če se dosežejo popolnoma enake mehanske lastnosti termitnega jekla in tirničnega jekla, je obnašanje teh dveh materialov med uporabo različno.

Čeprav so na razpolago sodobnejši progovni stroji, tako za uporovno varjenje kot za varjenje s snopom elektrod, se je AT-varjenje ohranilo in se najbolj razvilo prav na področju varjenja tirnic, kar je pomenilo korak naprej k uvajanju tako imenovanega neprekinjeno zavarjenega tira (Štefotič, 1970). To je vsekakor pomembno vplivalo predvsem na racionalnost vzdrževanja zgornjega ustroja, povečanje življenjske dobe delov in naprav, večjo varnost prometa ter uvajanje visokih hitrosti v železniškem prometu. Glede na masovno uporabo AT varjenja, tako v Sloveniji kot tudi v tujini, so naslednja poglavja namenjena podrobnejši obravnavi postopka.

3.1 Zgodovina alumotermijskega varjenja

Alumotermija je tehnika, ki sloni na principu redukcije kovinskih oksidov z aluminijem. Ta princip je odkril že sredi 19. stoletja ruski znanstvenik Nikolaj Baketov na univerzi v Ukrajini. Dokazal je, da aluminij pod vplivom visoke temperature reducira kovine iz oksidov, kljub temu pa postopek alumotermije ni bil udejanjen v praksi, saj so kemične reakcije potekale preveč eksplozivno.

Leta 1893 je Nemec Hans Goldschmidt začel eksperimentirati z AT-reakcijami za proizvodnjo čistega kroma in mangana. To delo je leta 1895 privedlo do patentiranja termitnega procesa. Zaradi velike količine sproščene toplote pri eksotermni reakciji ter vsestranskosti in uporabnosti termitnega procesa je Goldschmidt leta 1897 pričel ustanavljati korporacijo. Do konca 19. stoletja se je termitni proces uspešno uporabljal za popravila velikih litih in kovanih jeklenih delov. Šele leta 1898 je Goldschmidt odkril postopek nadzorovane redukcije, kar je privedlo do ideje, da se da postopek uporabiti tudi za varjenje, ker je reakcija eksotermna. Ob tem pa istočasno pridobimo dodajni material in potrebno energijo. Na ta način se je pričelo s spajanjem oziroma varjenjem prvih tirnic.



Slika 58: AT-varjenje v začetku 20. stoletja

(<http://www.railtech-uk.com/aluminothermic-welding/> (14.2.2013))

V zadnjem desetletju 19. stoletja je konjsko vleko na evropskih mestnih progah počasi zamenjala električna vleka. Z večanjem hitrosti in obremenitev tramvajskih vozil so naraščali tudi problemi na tirnih stikih, ki so na ta način postali zelo pomemben negativni dejavnik vpliva na življenjsko dobo vseh tirnih komponent. Leta 1899 je bil v nemškem mestu Essen, kjer je imela sedež tudi Goldschmidtova korporacija, na železniški progi zavarjen prvi AT-zvar. Železnice so hitro dojele prednosti in uporabnosti relativno enostavne metode, zato se je proces varjenja razširil po vsej Nemčiji. Leta 1904 je bilo v New Yorku ustanovljeno podjetje Goldschmidt Thermit Company in sledila je obsežna uporaba postopka na omrežju vseh tramvajskih prog v Združenih državah Amerike.

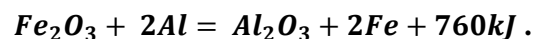
V zgodnjih letih 20. stoletja so inženirji na področju železnic skušali med drugim najti najboljše metode in praktične rešitve za področje varjenja tirnic. Podrobnejše raziskave na tem področju je opravil komite za varjenje tirnic v Združenih državah Amerike. Cilji dela so bili izboljšati in standardizirati postopke varjenja tirnih stikov. Leta 1932 je komite objavil končno poročilo, ki je vsebovalo obsežne rezultate nateznih, upogibnih, dinamičnih in številnih drugih preizkusov, skupaj z rezultati na področju testiran različnih varilnih procesov. Zbranih je bilo veliko osnovnih podatkov in

razvila so se številna nova znanja na področju varjenja tirnic. To se je na ta način izboljšalo, uporaba pa močno razširila.

Vse železniške družbe po svetu so pričele spoznavati prednosti varjenja tirnic. AT-varjenje je imelo prav tako pomembno vlogo v času obnove nemškega železniškega omrežja po drugi svetovni vojni. Ocenjuje se, da je bilo do leta 1980 v Združenih državah Amerike na omrežjih glavnih prog, položenih že 80.000 milj neprekinjeno zavarjenega tira, kar znaša približno 129.000 km. Čeprav vsi ti zvari niso bili zvarjeni po AT-postopku, se je to prav gotovo na področju varjenja tirnic najbolj uveljavilo (Lonsdale, 1999).

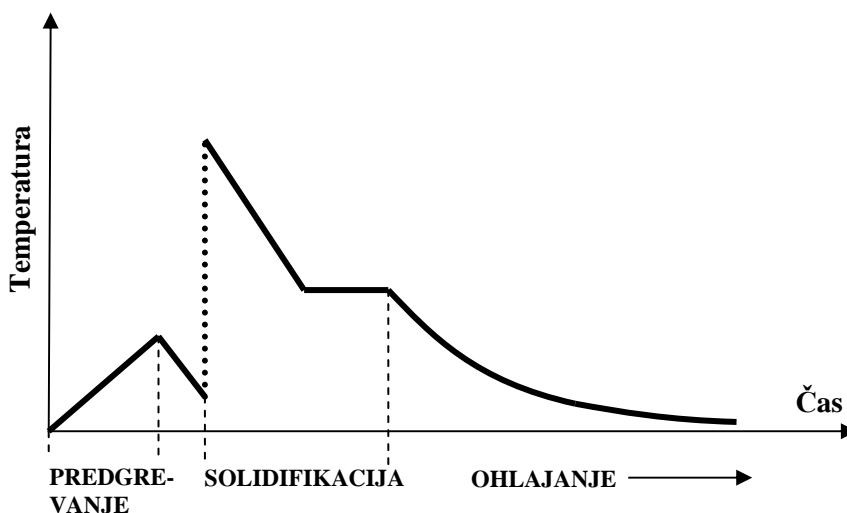
3.2 Alumotermijski proces

AT-varjenje je varjenje s taljenjem s pomočjo energije, ki se sprošča kot toplota pri eksotermni reakciji med čistim aluminijem in železovim oksidom. Pri tem dobimo raztaljeni dodatni material visoke toplotne vsebnosti. Mešanico aluminijevega zdroba in železovega oksida imenujemo termit. Aluminij reducira železov oksid do elementarnega železa, pri tem pa se sam oksidira v aluminijev oksid. Razvije se tako visoka temperatura, da se nastalo železo stali. Staljeno železo lahko zapolni razpoko med dvema železnima deloma. Množina sproščene toplote je odvisna od masnega razmerja aluminija in kovinskih oksidov. AT-reakcija se lahko izrazi z sledečo kemijsko enačbo (<http://www.railtech-uk.com/aluminothemic-welding/> (14.10.2012)):



Višek toplote 760 kJ nastane kot razlika med eksotermičnim in endotermičnim procesom, ki se odvija pri AT-postopku. Za redukcijo 1 Mol Fe_2O_3 se namreč porabi 830 kJ (endotermični proces), medtem ko se pri oksidaciji 1 Mol Al_2O_3 sprosti 1590 kJ (eksotermični proces). Iz enega kilograma zmesi železovih oksidov in aluminija (termitne zmesi) po vžigu in po končani kemijski reakciji, ki poteka pri reakcijski temperaturi približno 2500 °C pri že upoštevanih izgubah zaradi sevanja in konvekcije dobimo naslednje: okoli 3550 kJ toplote ter 476 g žlindre in 524 g termitnega železa (Marušić, 2009).

Pri varjenju je izredno pomembno, kako se odvija proces ohlajanja. V primeru hitre ohladitve bi namreč dobili večjo trdoto jekla, vendar bi bila njegova struktura grobozrnata. Takšen material je slabo odporen na udarce oziroma je žilavost takšnega jekla izredno majhna. Da bi se dosegle ustrezne mehanske lastnosti in zadovoljiva trdota, kar bi pomenilo, da se lastnosti bistveno ne razlikujejo od osnovnega tirničnega materiala, je potrebno proces ohlajanja voditi počasneje.



Graf 5: Distribucija temperature med AT-postopkom

(Chen, Lawrence, 2001, str. 17)

3.2.1 Tehnološki postopki alumotermijskega varjenja

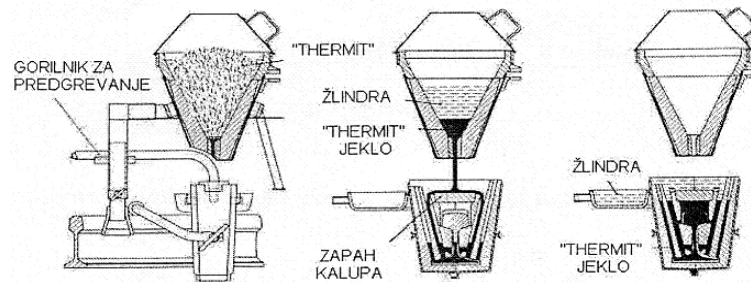
Klasično AT-varjenje se je vse od odkritja razvijalo in se še danes nenehno razvija. Razvoj je šel predvsem v smeri uporabe industrijsko izdelanih kalupov, odpravi ojačitve oziroma žmule (ang. collar) in v zmanjševanju časa predgrevanja. Ločimo več različnih tehnoloških postopkov varjenja. Tako imenovani postopek z medlitjem v sveži, vlažni, iz livarskega peska izdelani kalup se ne uporablja več. Uporabljajo se predvsem tako imenovani hitri postopki AT-varjenja, in sicer (Fendrich, 2006):

- postopek z ojačitvijo oziroma žmulo »SmW« (nem. Schweissen mit Wulst),
- postopek brez ojačitve oziroma žmule »SoW« (nem. Schweissen ohne Wulst),
- postopek brez predgretja »SoV« (nem. Schweissen ohne Vorwärmung),
- postopek s hitrim predgrevanjem »SkV« (nem. Schweissen mit kurzer Vorwärmung).

Postopek z ojačitvijo oziroma žmulo »SmW« se je razvil v letih 1959 do 1960. V primerjavi s predhodnim medlitvnim postopkom je tu prišlo do preoblikovanja oblike kalupa, kar je vplivalo na to, da so se ohlajevalne napetosti bistveno zmanjšale. Kljub temu je toplotno vplivno območje (HAZ angl.

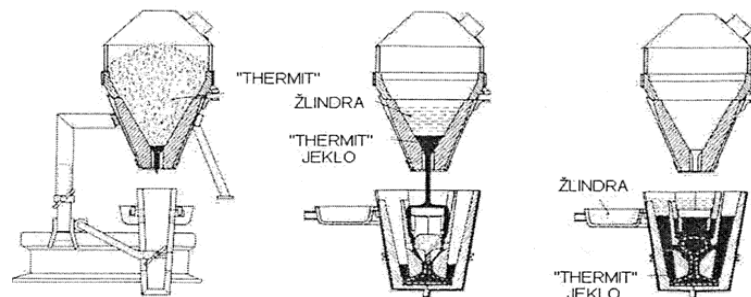
Heat Affected Zone) pri tem postopku izredno neenakomerno, kar je z vidika nosilnosti neugodno. Tudi zvarna žmula se je pokazala kot napetostno neugodna (Štefotić, 1970). Danes se omenjeni postopek praktično ne uporablja več.

Na spodnjih slikah so shematsko prikazani ostali trije postopki AT varjenja. Na podlagi analize slik je mogoče določiti bistvene razlike v procesu litja oziroma varjenja med posameznimi postopki.



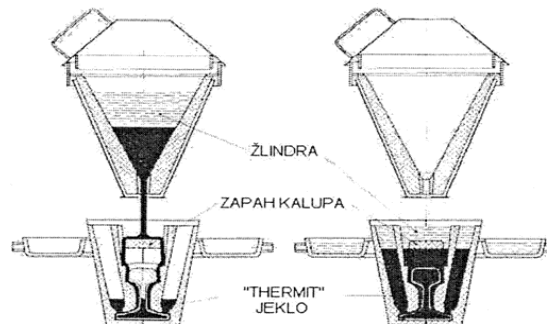
Slika 59: Shematični prikaz AT-postopka varjenja brez žmule »SoW«

(Fendrich, 2006)



Slika 60: Shematični prikaz AT-postopka varjenja brez predgrevanja »SoV«

(Fendrich, 2006)



Slika 61: Shematični prikaz AT-postopka varjenja z hitrim predgrevanjem »SkV«

(Fendrich, 2006, str. 323)

Iz slik 59, 60 in 61 je razvidno, da so razlike med posameznimi postopki predvsem v oblikah kalupov, načinu vlivanja in količinah termitne zmesi. Medtem ko se pri SoW in SkV-postopku uporablja predgrevanje, je pri SoV-postopku predgrevanje na račun izdatnejše varilne porcije ter intenzivnega oblivanja koncev tirnic, izključeno. Problem varilnega postopka SoV je varjenje v vlažnem in deževnem vremenu, saj obstaja nevarnost pojava por v zvaru. Postopek varjenja s hitrim predgrevanjem »SkV« se že vrsto let uspešno uporablja po vsem svetu in se je do danes dodobra razvil. Ker je postopek možno izvesti v izredno kratkem času, in je zvar izredno zanesljiv in trden, se takšen način AT-varjenja uporablja ne samo na standardnih progah, ampak tudi na progah za visoke hitrosti in na progah, kjer so predvidene visoke osne obremenitve.

Pomembna novost ki se nanaša na opremo potrebno za izvajanje postopkov AT varjenja, je tudi uporaba tako imenovanih prefabriciranih varilnih loncev za enkratno uporabo (SUC angl. Single Use Crucible), ki prinašajo številne prednosti v primerjavi z uporabo robustnih jeklenih trajnostnih loncev, predvsem z vidika kakovosti zvarov in enostavnosti uporabe.



Slika 62: Varilni lonci za enkratno uporabo (SUC)

(<http://thermitrex.co.za/products/suc-single-use-crucible-2> (3.3.2013))

3.2.2 Termitne zmesi (varilne porcije)

Varilne porcije so zasnovane in izdelane tako, da omogočajo doseganje specifičnih lastnosti termitnega jekla. Specifična struktura porcij omogoča izvedbo trdnega zvara, ki mora dosegati predpisano trdoto, ki se mora ujemati s trdoto tirnic, ki jih varimo. Majhne spremembe v sestavi porcije lahko izrazito vplivajo na lastnosti končnega produkta, zato se posamezne sestavine skrbno odmerjajo in kontrolirajo z natančnostjo enega grama.

Termitno železo, reducirano pri reakciji, je tehnično neuporabno. Da bi dosegli odgovarjajočo kvaliteto zvara, se termitni zmesi dodajajo legirni elementi, in sicer predvsem ogljik (C), mangan (Mn), silicij (Si), titan (Ti) ter vanadij (V) in krom (Cr). Termitno železo se na ta način pretvori v jeklo, ki ima dobre mehanske lastnosti v hladnem stanju. Vsebnost ogljika ne presega 0,50 %. Mangan

se legira predvsem zaradi obrabne trdnosti in je v mejah vsebnosti tirnic, to se pravi do 1,20 % (Štefotič, 1970).

Pomembna je tudi vsebnost aluminija, ki pri AT-reakciji nima samo vžigalne vloge, temveč tudi dezoksidira železo. V termitnem jeklu se dovoljuje od 0,35–0,5 % aluminija, s čimer se poveča čistost, trdnost, raztezanje in trdota termitnega jekla (Štefotič, 1970). V primeru, da je vsebnost aluminija v termitnem jeklu prevelika, lahko pride do krhkosti-lomne strukture, ta pa zaradi slabih tehnoloških lastnosti ni uporabna v varilni tehniki. Ker je reakcijska temperatura previsoka, se najpogosteje dodaja 15 % jeklenega zdroba, in sicer na celotno težo zmesi vseh komponent (porcije).

Normalna sestava termitne zmesi je zmes železovih oksidov, aluminijev zdrob, legirni dodatki (ferozlitine in ogljik), čisti drobni odpadki jekla (za povečanje izkoristka kovinske mase). Izvor železovih oksidov so okujine (iz kovačij ali valjarn) z vsaj 12–16 % Fe_2O_3 , z velikostjo zrn 0,15–1,5 mm. Čistoča aluminijevega zdroba naj bi bila čim večja (99,8–99,0 %). Utežno razmerje med oksidi in aluminijem v termitni zmesi je 3:1, izkoristek železa pa približno 91 % (Flerin, 2004). Skupna masa porcije znaša 7–17 kg. Varilne porcije se določi na podlagi teže tirnice, kvalitete tirnice in varilnega postopka

Preglednica 9: Oznake porcij glede na posamezne vrste tirničnega jekla (Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

Vrsta jekla	Oznaka porcije
R200	Z 70-S
R220	Z 80
R260Mn	Z 90-S
R320Cr	Z 110

3.3 Faze izvedbe alumotermijskega varjenja s hitrim predgrevanjem na terenu

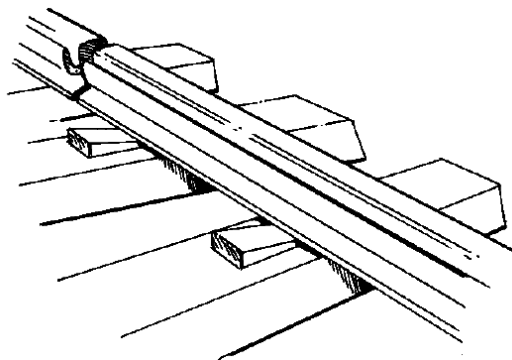
Gre za postopek AT varjenja s hitrim predgrevanjem, ki se v praksi uporablja na progah SŽ. Izvedba varjenja na terenu je povzeta po Priročniku za varilce, Railtech International (2010). Postopek zajema naslednja dela:

- priprava stika,
 - uravnavna stika
 - nameščanje kalupa,
 - predgretje,
 - namestitev varilnega lonca (topilnika),
 - ulivanje,
 - odstranjevanje kalupa,
 - obrezovanje,
 - grobo brušenje,
 - dokončanje zvarov.
-
- **Priprava stika**

V okolici zvarne rege se demontira pritrdilni pribor, in sicer na treh pragih v premi in na šestih pragih v krivini. Konca tirnice se očisti in skrtači, da se odstranita maščoba in rja. Slabo očiščene plasti rje namreč lahko povzročajo poroznost.

- **Uravnavanje stika**

Pri uravnavanju stika je potrebno upoštevati štiri parametre, in sicer: izvedbo varilne reže, horizontalno uravnavo, vertikalno uravnavo in ukrivljenost. Uravnavanje je izredno pomembno, saj se na ta način zagotovi dimenzijsko ustreznost zvara in njegovo življenjsko dobo. Če je zvar »prenizko« (negativna točka), bo prišlo ob vsaki vožnji čezenj do udarcev oziroma do povečanih dinamičnih učinkov. Če je zvar »previsoko«, bo prišlo do premikanja pragov. V obeh primerih se bo kakovost tira progresivno zmanjšala in/ali zvar se bo poškodoval. Za uravnavo se uporabljajo lesene zagozde (slika 63) ali kakšna druga oprema, ki ne poškoduje tirnice.

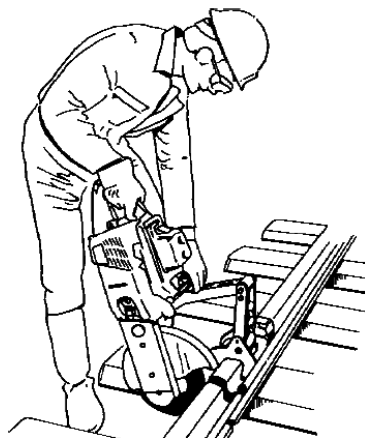


Slika 63: Uporaba lesenih zagozd za uravnavanje stika

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

i. Izvedba varilne reže

Varilna reža je prostor med obema tirnicama in mora biti v tolerančnem območju 25 ± 2 mm. Za izvedbo varilne reže se uporablja rezalka (slika 64), rezanje pa se izvede tako, da rez poteka pravokotno na vzdolžno os tirnice (če rez ni popolnoma pravokoten, ni mogoče dobiti pravilne tolerance).



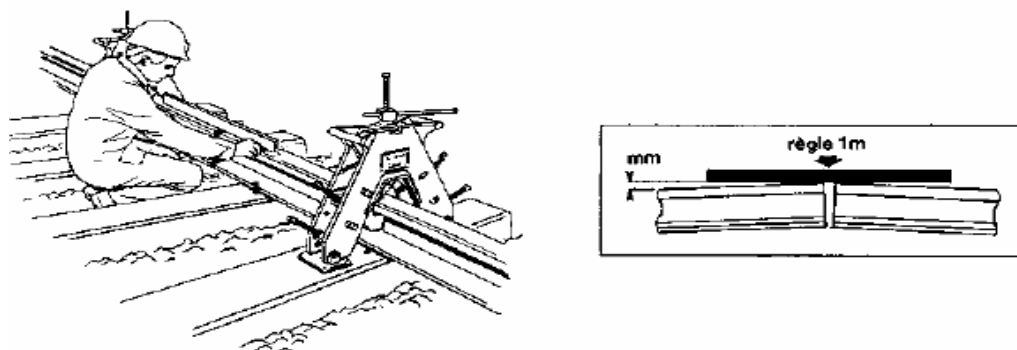
Slika 64: Priprava varilne reže

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

ii. Vodoravno uravnanje

Pred varjenjem morata konca tirnice tvoriti vrh, tako da po opravljenem varjenju, zaradi ohlaiditve, na mestu zvara ne bo nastala vdrtnina in da se bo oblikovala dodatna zadebelina, ki jo bo možno zbrusiti. Masa tirnične glave je namreč večja od mase noge tirnice. Zaradi tega se pri ohlajanju zvar spušča. Velikost spuščanja zvara med procesom ohlajanja je pri različnih tipih tirnic različna. Pri varjenju standardnih tipov tirnic znaša spuščanje 1–3 mm. Če želimo, da ostane vozna površina tirnice na

mestu zvara po ohladitvi ravna, je potrebno zvar zavartiti z določenim nadvišanjem. Meritev začetnega nadvišanja se izvede približno 50 mm od konca ravnega robu tirnice, kot prikazuje slika 65. Uporaba merilnih lističev omogoča, da se nadvišanje obeh koncev tirnic enakomerno naravna.

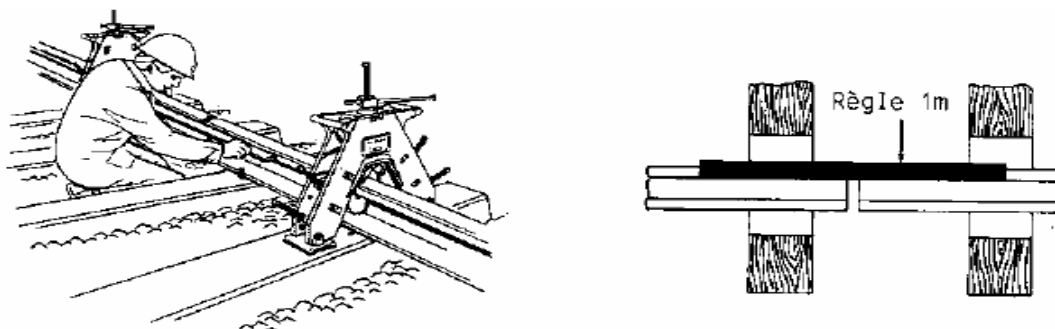


Slika 65: Vodoravna uravnavna stika

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

iii. *Uravnanje tirnice*

Uravnava se izmeri v notranjosti tira na notranji strani tirnic (kontrolira se poravnanoost na vozni površini, kot prikazuje slika 66. Metrsko ravnilo se položi na notranji rob tirnice, simetrično na vsako stran zvara, približno 16 mm pod vozno površino. Odstopanja morajo biti znotraj tolerančnih meja.

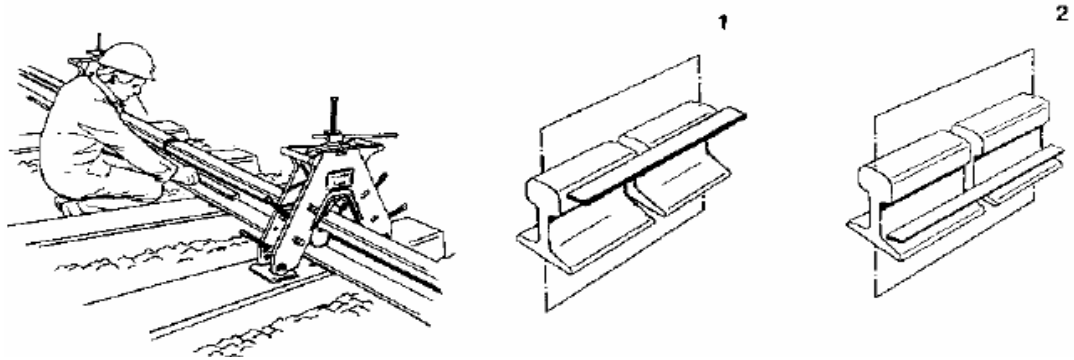


Slika 66: Uravnava notranjega robu tirnice

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

iv. Upogibanje tirnice

V tem primeru se skrbno pregleda oba nagiba tirnice, in sicer na notranji strani tirnične glave (slika 67, št. 1) in na temelju šiva tirnice (slika 67, št. 2)



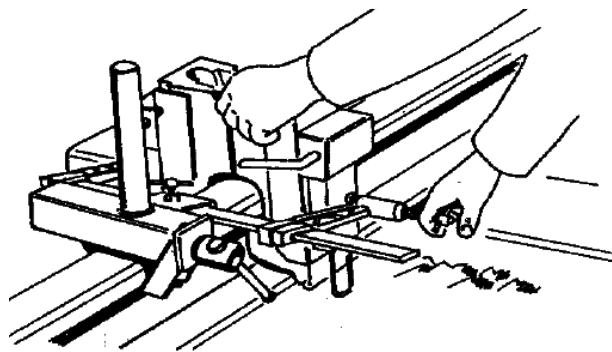
Slika 67: Kontrola nagiba tirnice

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

Uravnavanje stika se izvaja pred vsakim varjenjem, rezultate meritev in morebitna odstopanja pa se zapiše na poseben obrazec, ki je priložen med prilogami (prologa A).

- **Namestitev kalupa**

Kalup se namesti in centrira na os stika. Oba konca tirnice se obloži s polkalupom, ki morata biti nameščena tako, da se tesno prilegata (slika 68). Vse stike kalupa s tirnico se enakomerno zatesni z posebno pasto za tesnjenje (kitom), s čimer se zagotovi popolna tesnitev vseh stikov.

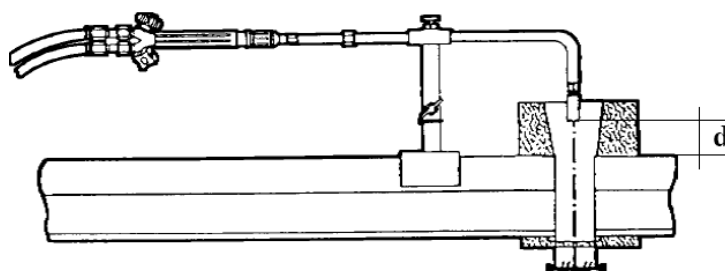


Slika 68: Nameščanje kalupa na zvarno rego

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

- **Predgretje**

Predgrevanje je eden najpomembnejših postopkov. Naloga predgrevanja je dvojna. Na ta način se popolnoma osuši kalup in tirnične konce. S tem dosežemo odstranitev morebitne vlage s površine varjenega materiala, hkrati pa zmanjšamo hitrost ohlajanja. Tako se izoblikujejo bolj duktilne in žilave mikrostrukture v delih zvara, ki jih ogroža hladna pokljivost. Poleg tega prevelika prisotnost vlage v zvaru lahko povzroči poroznost. Druga naloga predgrevanja pa je, da s tem dosežemo potrebno začetno temperaturo obeh koncev tirnic in stika. V nasprotnem primeru, zaradi razmeroma male mase taline (ki nastane po AT reakciji in ima približno $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$), ne bi prišlo do natalitve hladnih tirnic. Zato konca tirnic predhodno segrejemo na temperaturo približno $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Predgrevanje se izvede s posebnim gorilnikom s propanom in kisikovim plamenom, ki se ga namesti tako, da je cev gorilnika centrirana v kalup (slika 69). Čas predgrevanja je odvisen od tipa tirnice, in sicer za tirnice tipa do 60E1 znaša 4 minute, medtem ko za tirnice tipa 60E1 ali več 5 minut.

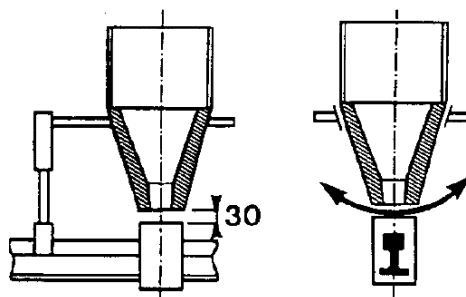


Slika 69: Namestitev gorilnika za predgrevanje

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

- **Namestitev varilnega lonca(topilnika) in reakcija**

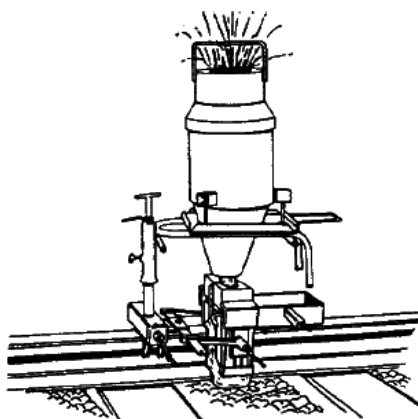
Po končanem predgretju se nad kalup namesti lonec, v katerega se strese vsebina varilne porcije. Razdalja med dnem lonca in vrhom modela znaša 25–30 mm (slika 70). V primeru če je v varilnem loncu prisotna vlaga, obstaja nevarnost pojava poroznosti v zvaru, zato je pomembno, da je ta popolnoma suh, kar je mogoče zagotoviti s predgrevanjem lonca s pomočjo plamena.



Slika 70: Namestitev varilnega lonca

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

Varilec nato s posebno vžigalico prižge termitno zmes. Reakcija se razvije v nekaj sekundah (slika 71). Prebod dna lonca se izvrši avtomatsko in talina steče v zvarno špranjo. Presežni korund, ki je posledica AT-reakcije, se izlije v primerno posodo za žlindro. Ohlajanje taline do trdnega stanja traja 5–6 minut.

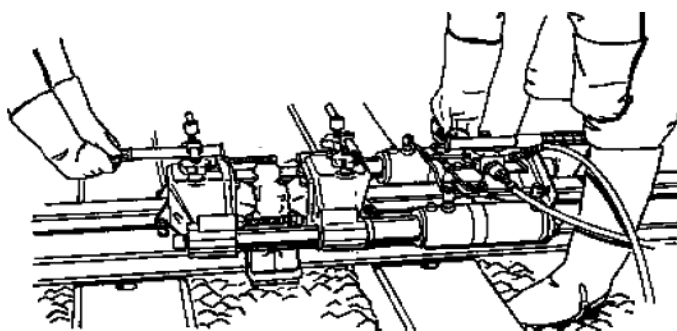


Slika 71: Potek AT-reakcije

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

- **Obrezovanje in brušenje zvara**

Po odstranitvi kalupa se zvar obreže s posebnim rezalnim orodjem (slika 72). Rezila se višinsko prilagodi tako, da je višina reza najmanj 3 mm nad vozno površino. Postopek obrezovanja se lahko izvede približno 6 min po končanem vlivanju. Bočne odlivke in višek dodatnega materiala se odstrani z vročim sekalnim dletom in kladivom v času, ko je kovina še mehka.

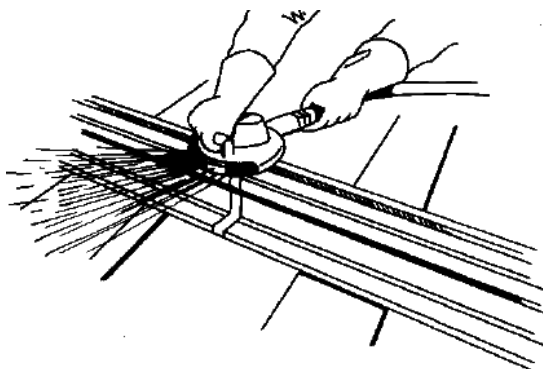


Slika 72: Obrezovanje zvara

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

Ko se nastali zvar popolnoma ohladi na temperaturo okolice, sledi grobo brušenje zgornjega dela glave tirnice in bočne površine. Po izvršenem grobem obrezovanju mora ostati še najmanj 0,5 mm zvara nad površino tirnice. Nanovo zavarjeni timi odsek se prične uporabljati za promet, ko temperatura glave tirnice v osi zvara doseže 350 °C.

Dokončno brušenje se izvede šele takrat, ko se zvar popolnoma ohladi in po možnosti po tem, ko je preko zvara prevozilo že nekaj vlakov. Jasno je, da je geometrijska kakovost zvara odvisna predvsem od prvotnih nastavitvev (priprave stika za varjenje), zato se po opravljenem grobem in dokončnem brušenju ta nastavitev preveri. Za dokončno brušenje se uporabljajo kamene ali profilne brusilke (slika 73). Glede na Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010) so dovoljene tolerance pri brušenju zvarov na vozni površini + 0.35 in – 0.2 mm, na voznem robu pa + 0.2 mm in – 0.3 mm.



Slika 73: Dokončno brušenje zvara

(Priročnik št. 121, Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic, Railtech international)

Vsi podatki v zvezi s postopkom varjenja se beležijo na poseben obrazec (opisni list zvara), ki je priložen v prilogi A. Med drugim je na obrazcu navedeno: datum varjenja, ime varilca, temperatura v tirnici, podatki v zvezi z varilno opremo, časi predgrevanja in vrsta drugih podatkov.



Slika 74: Končni izgled zvara

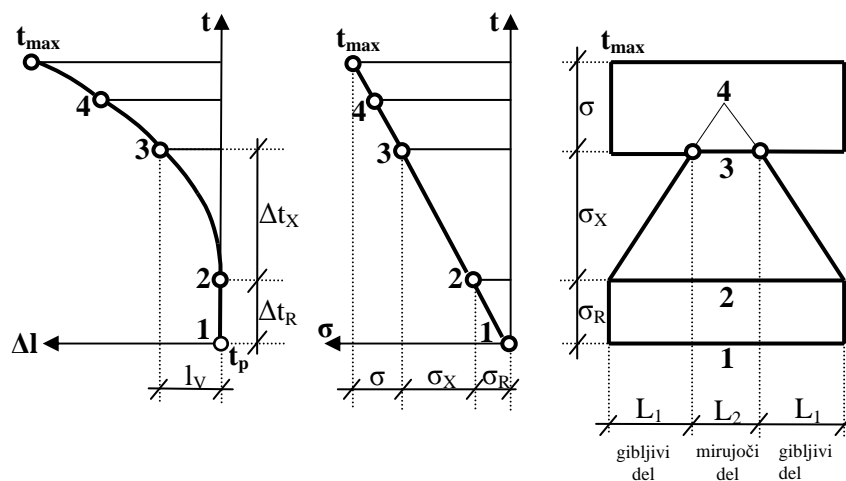
(http://www.thermit-welding.com/thermit_welding_process.php (24.2.2013))

3.4 Varjenje tirnic v neprekinjeno zavarjeni tir

Neprekinjeno zavarjeni tir (v nadaljevanju NZT) je najsodobnejša konstrukcija zgornjega ustroja tira s tirnicami, zvarjenimi v poljubne dolžine. Takšna vrsta tira v celoti odpravlja pomanjkljivosti stikovanega tira, v katerega so se vgrajevale kratke tirnice dolžin do 45 m, posledica česar je bilo veliko število tirnih stikov, ki so povzročali velike dinamične obremenitve na tir, nemirnejšo vožnjo, slabšo stabilnost tira, večje vozne odpore in večjo obrabo kolesnih vencev. Na NZT je vožnja mirna in udobna, brez udarjanja na spojih,. Stroški vzdrževanja takega tira so bistveno nižji v primerjavi z vzdrževanjem stikovanega tira, hitrosti vlakov pa višje (Zgonc, 2010).

3.4.1 Napetosti v neprekinjeno zavarjenem tiru zaradi temperaturnih sprememb

O NZT govorimo takrat, kadar se dilatacija pri naraščanju temperature zapre oziroma se dilatacija pri padanju temperature v celoti odpre, še preden preide celotna tirnica v gibanje. Na sliki 75 so po vrsti prikazani diagram dilatacij, diagram napetosti in razpored napetosti po dolžini tirnice v odvisnosti od spreminjanja temperature. Izhodišče je točka 1, v kateri je tirnica položena pri srednji temperaturi $t_p = 17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zgonc, 2010).



Slika 75: Dilatacije in napetosti zaradi temperaturnih sprememb v NZT

(Zgonc, 2010)

Posamezne oznake na sliki 75 pomenijo sledeče:

t_{max}	maksimalna temperatura v tirnici, ki velja za naše klimatsko območje in znaša +65 °C,
Δt_R	sprememba temperature, ki je potrebna za premaganje odpora v spojki,
Δt_X	sprememba temperature, ki je potrebna za premaganje sile odpora v točki x ,
l_v	dolžina dilatacije pri polaganju,
Δt_r	sprememba dolžine tirnice,
σ_R	napetost v tirnici zaradi spremembe temperature Δt_R ,
σ_X	napetost v tirnici zaradi spremembe temperature Δt_X .

V točki 1 je tirnica položena pri srednji temperaturi t_p v breznapetostnem stanju. Pri porastu temperature iz točke 1 v smeri točke 2 se dilatacija ne spreminja. Napetosti pri tem po celotni dolžini tirnice naraščajo, dokler ne dosežejo vrednosti σ_R , ki ustreza spremembi temperature Δt_R , ki je potrebna za aktivacijo sile trenja v spojki (točka 2). Od tu dalje, ko je upor spojke premagan, se tirnica prične raztezati od obeh koncev proti sredini. Dilatacija se pri nadaljnjem naraščanju temperature manjša, dokler se v točki 3 popolnoma ne zapre. V tem primeru je torej prišlo do zaprtja dilatacije še predno je celotna tirnica prešla v gibanje (slika 75). Trenje na celotni dolžini tirnice ni nikoli premagano, zato tirnica v celoti nikoli ne preide v gibanje. Od tu naprej, pri nadaljnjem naraščanju temperature do t_{max} napetosti v tirnici naraščajo po enačbi (Zgonc, 2010):

$$\sigma = \alpha E \Delta t . \quad (27)$$

Če v enačbo (27) vstavimo vrednosti $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, ki predstavlja koeficient temperaturnega raztezka jekla in vrednost $E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$, ki predstavlja elastični modul jekla dobimo naslednjo enačbo:

$$\sigma = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^7 \Delta t = 240 \Delta t . \quad (28)$$

Enačba (28) jasno pokaže, da se za vsako stopinjo spremembe temperature pri preprečenem pomiku, napetost v tirnici spremeni za 241 N/cm². Kakor je razvidno iz slike 77 je NZT konstrukcija z nepomičnim srednjim delom in pomičnima koncema na vsaki strani, ki sta v stalnem gibanju. Skupna dolžina NZT znaša:

$$L = L_1 + L_2 + L_1 = 2 * L_1 + L_2 . \quad (29)$$

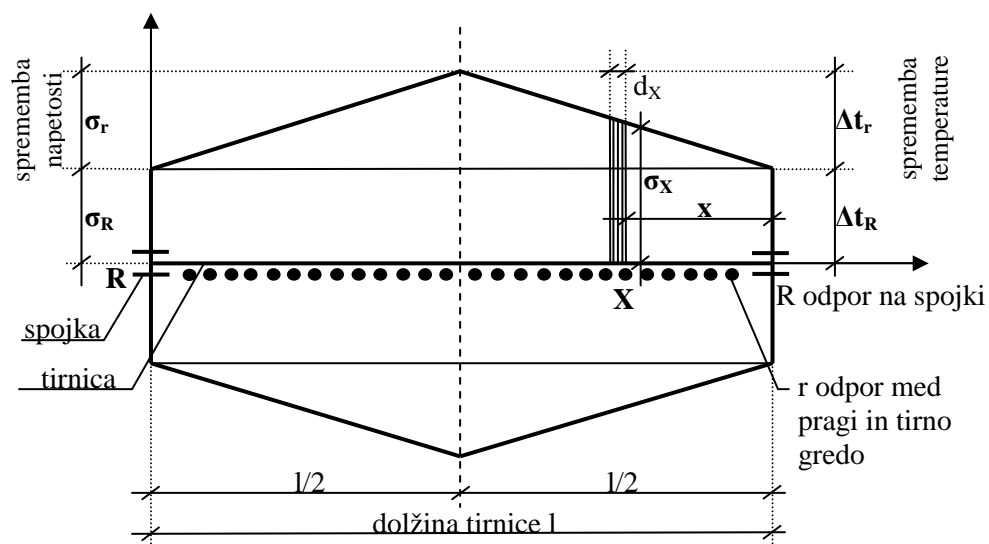
Dolžina gibljivega dela je odvisna od (Marušić, 2009):

- tipa vgrajene tirnice in tipa pritrilnega pribora,
- temperaturne razlike med dejansko in potrebno temperaturo,
- kvalitete vzdrževanja NZT.

Izpeljava naslednjih enačba je povzeta po Zgoncu (2010). Dolžino gibljivega dela NZT lahko izračunamo na podlagi naslednje enačbe:

$$F_x = R + rx \text{ [N]}, \quad (30)$$

F_x je mejna sila v neki točki X , ki je za dolžino x oddaljena od konca tirnice (slika 76) in je ravno enaka sili odpora v tej točki. R pomeni odpor trenja na spojki, rx pa odpor trenja med pragi in tirno gredo na razdalji x .



Slika 76: Diagram mejnih napetosti in mejnih temperatur

(Zgonc, 2010)

Če poznamo mejno silo F_x , lahko izračunamo mejno napetost na podlagi naslednje enačbe:

$$\sigma_x = \frac{R+rx}{s} = 240\Delta t \left[\frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \right]. \quad (31)$$

Iz enačbe (31) lahko izrazimo dolžino gibljivega dela NZT:

$$x = \frac{\sigma S - R}{r} = \frac{240 \Delta t S - R}{r} \approx 80 \text{ m}, \quad (32)$$

pri čemer je:

Δt največja možna temperaturna razlika v tirnici [$^{\circ}\text{C}$],

S površina prečnega prereza tirnice [cm^2],

R odpor med tirnico in spojko [N],

r odpor med pragovi in tirno gredo [N/cm].

Velikost odpora trenja med tirnico in spojko R v tirnem stiku znaša 50.000–250.000 N. Pri računu največkrat vzamemo povprečno vrednost in sicer $R = 100.000$ N. Povprečna vrednost vzdolžnega odpora med pragi in tirno gredo r , reducirano na dolžinski meter tirnice znaša $r = 90$ N/cm. Na tem mestu je potrebno poudariti, da je odpor trenja med tirnico in pragi praviloma višji od odpora trenja med pragi in tirno gredo. Iz tega razloga lahko predpostavimo, da je tirnica tako čvrsto pritrjena na prage, da se trenje med tirnico in pragi sploh ne aktivira oziroma ne pride do vzdolžnega pomika med tirnico in pragi. Odpor med tirnico in pragi se tako upošteva zgolj pri zmrznjeni tirni gredi, saj je v tem primeru ta manjši od odpora med pragi in tirno gredo.

V NZT se vgrajujejo tirnice le pri ustrezni temperaturi in v breznapetostnem stanju. Poudariti je potrebno, da temperatura v tirnici ni enaka temperaturi okoliškega zraka. Tako je lahko poleti temperatura tirnice na soncu za 20–25 $^{\circ}\text{C}$ višja od temperature zraka v senci (Marušić, 2009). Zaradi tega imamo vse temperature v NZT za temperature v tirnici, izmerjene s tirnim termometrom, in sicer na licu mesta na tirnici, vgrajeni v tir, ali na 250 mm dolgem kosu tirnice, ki ga izpostavimo istim pogojem (slika 77). Temperatura na tirnem termometru je identična s temperaturo tirnice šele eno uro po namestitvi termometra (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).



Slika 77: Merjenje temperature v tirnici

V zimskem času se temperatura v tirnici bistveno ne razlikuje od temperature zraka, poleg tega temperatura tirnice ni nikoli nižja od temperature zraka. Pri naraščanju temperature ta v tirnici narašča hitreje od temperature zraka, medtem ko pri padanju temperature ta v tirnici pada počasneje od temperature zraka. V NZT razlikujemo sledeče temperature (Milojković, 1986):

- **Srednja temperatura** t_{sr} se za določeno klimatsko območje dobi na podlagi dolgoletnih merjenj maksimalnih (t_{max}) in minimalnih (t_{min}) temperatur na tem področju in predstavlja aritmetično sredino teh dveh temperatur. Za klimatsko območje na ozemlju RS znaša:

$$t_{sr} = \left(\frac{t_{max} + t_{min}}{2} \right) = \frac{65\text{ °C} + (-30\text{ °C})}{2} = 17,5\text{ °C} . \quad (33)$$

- **Potrebna temperatura** t_p je temperatura tirnice v času sproščanja NZT od notranjih napetosti. Odvisna je od srednje letne temperature v tirnici na nekem klimatskem področju. Vključevanje tira v NZT, torej končno varjenje odsekov v dolge tirne trakove ob predhodnem sproščanju notranjih napetosti v tirnici, se izvaja pri potrebni temperaturi t_p . Glede na to, da je pojav izbočenja tira pri visokih temperaturah nevarnejši od pojava razpok tirnic pri nizkih temperaturah, je s pravilnikom določeno, da se končno varjenje in s tem vzpostavljanje NZT izvaja pri srednji letni temperaturi, povečani za 5 °C. To pomeni, da je:

$$t_p = t_{sr} + 5\text{ °C} = 22,5\text{ °C} . \quad (34)$$

Če pri tem upoštevamo še tolerance, znotraj katerih je potrebno izvesti končno varjenje, in sicer ± 5 °C, (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010) in pritrditev tirnic, dobimo temperaturni interval od +17,5 °C do +27,5 °C. Iz tega lahko izračunamo največjo možno temperaturno razliko, ki lahko nastopi v NZT. Pri naraščanju znaša ta 47,5 °C (65 °C – 17,5 °C), pri padanju temperature pa 57,5 °C (27,5 °C + 30 °C). Sile, ki zaradi naštetih temperaturnih sprememb nastopijo v NZT, je potrebno na ustrezen način obvladati da se prepreči izbočenje oziroma pretrganje tira.

3.4.2 Pogoji za gradnjo neprekinjeno zavarjenega tira

Vsa dela, ki jih nameravamo opravljati v zvezi z varjenjem tirnic v NZT, se morajo opravljati na podlagi izdelanega tehnično-eksplotacijskega elaborata, ki mora vsebovati:

- vse objekte na odseku varjenja NZT,
- podatke o osi in višini tira na tem odseku proge,
- podatke o vseh ostalih elementih zgornjega ustroja proge,
- krajši opis postopkov in del pri varjenju in sproščanju tira v NZT,
- opis mehanizacije, ki se pri takšnem delu uporablja.

NZT se lahko gradi (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010), kadar:

- sta zgornji in spodnji ustroj tira urejena in stabilna,
- je tirna greda iz tolčenca predpisane granulacije in profila,
- je tir reguliran in stabiliziran,
- je pritrdilni pribor standardne oblike čvrsto in zanesljivo pritrjen,
- je pritrdilni pribor čvrsto in zanesljivo pritrjen in nudi potreben odpor vzdolžnim in bočnim silam.

Najmanjši dovoljeni polmer krivine, do katerega se NZT še lahko vgrajuje, znaša za naše razmere (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010):

- 500 m pri lesenih pragih,
- 400 m pri betonskih pragih.

Pri vgrajevanju NZT v krivinah s polmerom, ki je manjši od 500 m, in v krivinah z polmerom manjšim od 400 m, je potrebno vgraditi naprave za povečanje bočnega upora tirne rešetke. Pri nas so standardizirane tako imenovane kape proti bočnemu pomiku tira. Na obeh skrajnih gibljivih delih NZT, in sicer 50–80 m od tirnega stika je potrebno vgraditi ostrorobe prage in posebne naprave proti vzdolžnemu pomiku tirnic (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

3.4.3 Varjenje tirnic v odseke

Odločitev za gradnjo NZT mora biti sprejeta že pred naročanjem tirnic. Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010) določa, da se za vgrajevanje v NZT naročajo tirnice čim večjih dolžin, samo z eno, to je z drugo luknjo na vsakem koncu tirnice. Pred varjenjem v odseke se tirnice polagajo z začasnimi dilatacijami, in sicer 10 mm pri temperaturi polaganja $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5 mm pri temperaturi polaganja med $10\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 0 mm pri temperaturi polaganja $> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pred varjenjem tirnic v odseke, katerih skupna dolžina naj ne bi presegala 360 m, je treba tir zregulirati, odstraniti spojke, stike nadvišati 1–2 mm, napraviti dilatacijsko rego 20–22 mm in premakniti prage na razmik, ki je primeren za varjenje. Varjenje v odseke se lahko izvaja pri poljubni temperaturi, vendar je priporočljivo, da se izvede pri temperaturi nad $+ 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in pod $+ 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Izjemoma se lahko vari tudi pri temperaturah, ki so nižje od $+ 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ob pogoju, da se tirnico na dolžini enega metra na obe strani zvara predhodno segreje na $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odvisno od temperature, pri kateri je bila tirnica predhodno zavarjena v odseke, se bo ta pri kasnejšem sproščanju bodisi skrčila bodisi podaljšala. Po varjenju je treba zvar vizualno in ultrazvočno pregledati. Ob prevzemu zvarov je potrebno narediti zapisnik, za vsak zvar pa se mora predložiti atest (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

3.4.4 Sproščanje neprekinjeno zavarjenega tira

Sproščanje napetosti v tirnicah je najpomembnejši proces pri vključevanju teh v NZT. Le pravilno sproščene napetosti v tirnicah nam zagotavljajo urejeno in varno železniško progo. Če se namreč pri postopku sproščanja notranjih napetosti držimo pravilnega postopka in temperatur, imamo pri kasnejšem vzdrževanju bistveno manj težav in stroškov.

Sproščanje tirnic se izvaja na 3 načine:

- naravno pri potrebni temperaturi t_p ,
- umetno z ogrevanjem tirnic na potrebno temperaturo,
- umetno z izvajanjem mehanske sile prednapenjanja (s hidravličnimi napravami za raztegovanje tirnic).

Delo na področju sproščanja NZT je sestavljeno iz sledečih faz (Marušić, 2009):

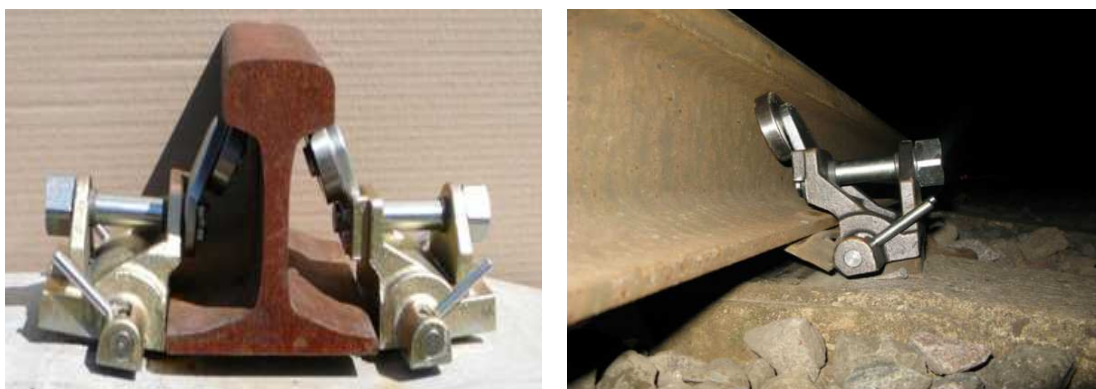
- pripravljalna dela,
- osvobajanje tirnic z odvijanjem pritrdilnega pribora,
- dvigovanje tirnic iz ležišč in postavljanje le teh na valjčke,
- spuščanje tirnic z valjčkov in postavljanje nazaj na podložne plošče,
- pričvrščevanje pritrdilnega pribora in povezovanje sproščenih delov proge z ostalimi deli proge,
- končno pričvrščevanje pritrdilnega pribora.

3.4.4.1 Naravno sproščanje pri potrebni temperaturi t_p

Po vzpostavitvi zapore proge se prične z osvobajanjem pritrdilnega pribora. Ta postopek je seveda odvisen od tega, ali je predhodno polaganje in varjenje tirnic v odseke izvedeno pri višji ali nižji temperaturi od tiste, pri kateri se vrši sproščanje. Če so namreč tirnice položene in zavarjene pri višji temperaturi od t_p , bo prišlo med procesom sproščanja (pri odstranjevanju pritrdilnega pribora) do skrajšanja tirnic. Navedeno skrajšanje tirnic povzroči velike dilatacije, zato tirnice ni mogoče neposredno zavariti z ostalim delom NZT, ampak je potrebno vstaviti tirnico dolžine najmanj 6 m, saj je razmik prevelik, razdalja med dvema AT-zvaroma pa ne sme biti krajša od 6 m. Zaradi tega je pomembno, v primeru če so tirnice zvarjene pri višji temperaturi od t_p , da se odstranjevanje pritrdilnega pribora odseka proge vrši samo z ene strani, medtem ko druga stran odseka ostane pritrjena.

Če so tirnice položene in zavarjene v odseke pri nižji temperaturi od t_p , prihaja med procesom odstranjevanja pritrdilnega pribora do podaljšanja tirnic, zato pri končnem varjenju na konceh odseka ni potrebno vstavljati krajših tirnic. V navedenem primeru se lahko odstranjevanje pritrdilnega pribora izvaja istočasno z obeh straneh odseka, saj se pri končnem varjenju višek tirnice enostavno odreže do te mere, da je zagotovljena ustrezna dilatacija.

Ko je pritrdilni pribor, ki povezuje tirnice in pragove, odstranjen, se pristopi k dvigovanju teh na posebne valjčke (slika 78), ki so nameščeni na vsakem desetem pragu v premi in na vsakem osmem pragu v krivini. S tem procesom se omogoči lažje raztezanje oziroma krčenje tirnic. Smer dvigovanja na valjčke poteka od bodočega končnega zvara proti fiksni točki odseka (mesto kjer je pritrdilni material pričvrščen).



Slika 78: Valjčki za sproščanju tirnic v krivini (levo) in v premi (desno)

(<http://www.pandrolusa.com/news.php> (10.1.2013))

Nato se z udarjanjem z lesenimi bati (slika 79), ki potekajo od fiksnega konca proti sprostilnemu zvaru, po gornji površini omogoči, da se tirnica raztegne oziroma skrajša, in na ta način osvobodi notranjih napetosti, ki so posledica različnih temperatur pri vgradnji in varjenju tirnic v odseke (Marušić, 2009).



Slika 79: Udarjanje tirnice z lesenimi bati

(Šavora, 2013)

Ko je tirnica dvignjena na valjčke, je njena sprememba dolžine odvisna od spremembe temperature. Skozi celoten čas, ko je tirnica na valjčkih, se spremlja potek temperature. Najnižja temperatura, pri kateri je možno pričeti s spuščanjem tirnice z valjčkov nazaj v ležišča, je za 3 °C manjša od t_p , nižja ko je najvišja oziroma zgornja meja temperature za 3 °C višja od t_p . Spuščanje se lahko izvaja od sredine proti koncema odseka (če je dolžina odseka daljša od 500 m) ali od enega konca proti drugemu (če je dolžina odseka krajša od 500 m). Istočasno s spuščanjem tirnice se izvaja tudi zategovanje pritrdilnega pribora. Povprečna temperatura, pri kateri je NZT sproščen, se izračuna po enačbi (Marušić, 2009):

$$t_{ps} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} [^{\circ}\text{C}] . \quad (35)$$

V enačbi (35) mora t_{ps} ustrezati tolerančnemu območju ($t_p - 5^{\circ}\text{C} < t_{ps} < (t_p + 5^{\circ}\text{C})$), pri čemer je:

- t_1 temperatura tirnice na začetku spuščanja tirnice z valjčkov,
- t_2 temperatura tirnice na koncu spuščanja tirnice z valjčkov,
- t_3 temperatura tirnice v času, ko sta konca NZT pričvrščena na 30 pragov, na ostalem delu pa je pričvrščen vsak peti prag.

Slaba stran naravnega sproščanja je v tem, da je potrebno čakanje, da se doseže potrebna temperatura, pri čemer obstaja nevarnost, da ta v času sproščanja »uide«. Namreč za celoten postopek dviganja, sproščanja in pritrjevanja tirnic je na razpolago le temperaturno območje $22,5^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ do zanesljive pritrditve vsaj vsakega tretjega praga. Iz tega sledi, da sta za naravno sproščanje ugodna zgolj dva letna časa, in sicer pomlad in jesen, v poletnem času pa le nočne ali zgodnje jutranje ure (Štefotič, 1970).

3.4.4.2 Umetno ustvarjanje razmer, ki so ekvivalentne potrebni temperaturi t_p

Kadar predpisanega temperaturnega intervala ni mogoče doseči po naravni poti, se uporabi umetni način podaljševanja tirnic. Postopek z ogrevanjem tirnic je ugodnejši, čeprav je potrebno dodatno delo-segrevanje. Za segrevanje se uporablja specialna naprava na tirnem vozičku, ki z butan-kisikovim plamenom od strani ogreva tirnici. Naprava se pomika po tiru, ki je prav tako dvignjen na valjčke s hitrostjo, ki je premosorazmerna razliki med temperaturo tirnice in predpisano temperaturo. Postopek segrevanja se vedno prične na sredini odseka in se izvaja v obe smeri, dokler se v tirnici ne doseže predpisane temperature. Predhodno je potrebno točno odmeriti kontrolne točke, ki so zabeležene na nogi tirnice, ter določiti razlike v dolžini, ki se z segrevanjem izenačijo z dolžino pri potrebni temperaturi (Štefotič, 1970).



Slika 80: Naprava za segrevanje tirnic

(<http://www.robels.info/en/products/detail.asp?id=136&tit=Rail%20Heater> (20.12.2012))

Iz prakse je znano, da se toplota v tirnici ohranja dlje časa oziroma se počasi izgublja. Čas, ki je potreben, da se tirnica ohladi za 1 °C, je pri zmerno hladni temperaturi približno 5 minut. Tirnico se razdeli na odseke (npr. 20 m), nato pa se za vsak odsek izračuna, za koliko se mora ta segreti, da se doseže potreben raztezek. Ko se na koncu tirnica raztegne na ustrezno dolžino, se izvede končni zvar.

Naravno sproščanje pri potrebni temperaturi t_p je dokaj negotov in tvegan postopek, saj smo v celoti odvisni od zunanjih vremenskih razmer in krajevni razmer na posameznih mestih sproščanja. Da se izognemo vsem tem problemom, se je poleg uporabe naprav za segrevanje tirnic uveljavil tudi postopek uporabe tirnih tenzorjev, to je hidravličnih naprav za raztegovanje tirnic. Omenjeni postopek uporabljamo torej takrat, ko so zunanje temperature nižje od predpisanih vrednosti in ustrezajo temperaturnemu razponu od 0 °C do $t_p - 5^{\circ}\text{C}$.



Slika 81: Hidravlični tenzor in pritrjevanje tirnice v območju tenzorja

(Šavora, 2013)

Hidravlična naprava z vlečno silo do nekje 700 kN ustvarja prednapetost, premosorazmerno temperaturi, tako da je napetost v tirnicah pri temperaturi t_p enaka 0. Potrebno podaljšanje tirnic se izračuna po enačbi (Marušić, 2009):

$$\Delta L = \alpha L \Delta t , \quad (36)$$

pri čemer je:

ΔL raztezek tirnice [mm],

α koeficient raztezka jekla,

L dolžina tirnice ki jo sproščamo [m],

Δt razlika med temperaturo izmerjeno v tirnici in potrebno temperaturo.

Hidravlične tenzorje je potrebno odstraniti šele, ko je končni zvar popolnoma ohlajen, sicer obstaja nevarnost, da zvar počí.

O sproščanju NZT je potrebno voditi evidenco. Med drugim mora evidenca vsebovati podatke o dolžini odseka, ki se ga sprošča, podatke o temperaturah, datum in ura sproščanja itd (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010). Primer obrazca je podan v prilogi C. Spremljanje in evidentiranje temperatur in drugih dogodkov v zvezi z vgrajevanjem NZT je prvi pogoj za pravilno izvedbo, vzdrževanje, nadzor in uporabo tira, zavarjenega v NZT.

3.4.5 Končno varjenje

Končno varjenje odsekov v NZT se lahko izvede šele po končni regulaciji in stabilizaciji tira, oblikovanju tirne grede ter ko so tirnice sproščene vseh napetosti. Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010) določa, da je temperaturni interval, v katerem je treba izvesti postopek končnega varjenja posameznih odsekov tira enak $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, oziroma v mejah od $+17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+27,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Če je prišlo do skrajšanja tirnic, se vstavi kos tirnice z minimalno dolžino 6 m, in se izvede po dva zvara na vsakem kraku. Če je prišlo do podaljšanja tirnic, se tirnice odreže na ustrezno dolžino, tako da se zagotovi predpisana širina dilatacije, ki ustreza AT-postopku varjenja. Po končnem varjenju je treba tirnice čim hitreje pritrditi na prage, začenši od prostega konca proti že urejenemu tiru. Hkrati s tem se izvajajo tudi druga dela na tiru, kot je dopolnitev in utrditev tirne grede, vgraditev naprav proti vzdolžnemu potovanju tirnic, nameščanje in označevanje kontrolnih oznak za spremljanje vzdolžnih in prečnih pomikov tira.

3.5 Zanesljivost in kontrola zvarov

3.5.1 Neporušne metode

Z uporabo neporušnih metod določamo kvaliteto zvarjenih spojev in njihovo sprejemljivost v skladu z normami in predpisi, ki določajo nivo in vrsto dopustnih napak v zvarnih spojih. Z uporabo neporušnih metod lahko diagnosticiramo zgolj napake, ki so nastale zaradi varjenja in so krivci zanje varilec, oprema ali nepravilen postopek varjenja.

Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010) določa, da je potrebno po varjenju vse AT-zvare vizualno, geometrijsko in ultrazvočno pregledati in preveriti brezhibnost vozniških površin z 1 m dolgim jeklenim ravnilom. Pri tem mora biti kvaliteta zvarov obeležena na terenu. O pregledu je potrebno podati pisno poročilo z rezultati.

3.5.1.1 Vizualna kontrola

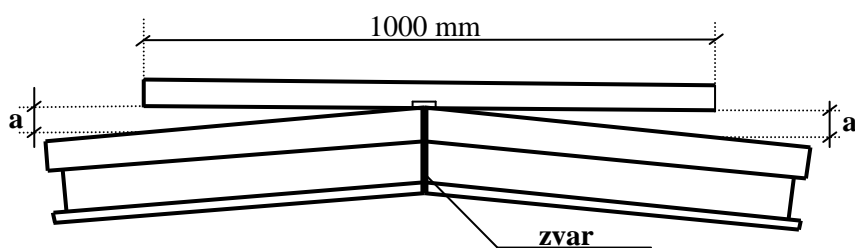
Po dokončnem brušenju je potrebno torej vsak zvar vizualno pregledati. Pregled zajema celotno površino zvara in območja tirnic v okolici zvara. Na površini glave tirnice, ki je bila brušena, ne sme biti vidnih nobenih poškodb (odtisi rezalnikov, praske brusilnikov, preluknjanost kovine itd.). Zvar tudi ne sme imeti livarskih pomanjkljivosti, kot so (Priročnik št. 121, Railtech international):

- poroznost,
- razpoke zaradi krčenja,
- vključki peska ali žindre,
- črni madeži,
- izboklinske deformacije itd.

Zvari, na katerih so prisotne poškodbe, ki so lahko nevarne, se morajo odstraniti. Ostale napake se morajo popraviti v skladu z zahtevami naročnika. Vse ugotovitve med vizualnim pregledom, se vpišejo v poseben obrazec, ki je priložen v prilogi B.

3.5.1.2 Kontrola geometrije zvara

Na vsakem zvaru, ko se ta ohladi na temperaturo okolice, je potrebno narediti geometrijsko kontrolo zvara. Pri tem se merjenja izvaja z ravnilom dolžine 1000 mm na vozniški površini (slika 82) in na vozniških robovih tirnice. Po pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog (2010) dovoljena odstopanja po višini (na vozniški površini) znašajo od -0.2 mm do +0.35 mm (višinska kontrola), na vozniškem robu pa od +0 mm do -0.3 mm (smerna kontrola). Navedena odstopanja so lahko tudi drugačna, odvisno od tega, kakšne tirnice se varijo, s kako visoko hitrostjo se vozi po tiru in na kakšnem mestu so tirnice vgrajene (Marušić, 2009). V primeru, da ti pogoji niso izpolnjeni, se zvar zavrne. Podatki o meritvah geometrije se vpišejo v obrazec (priloga B).



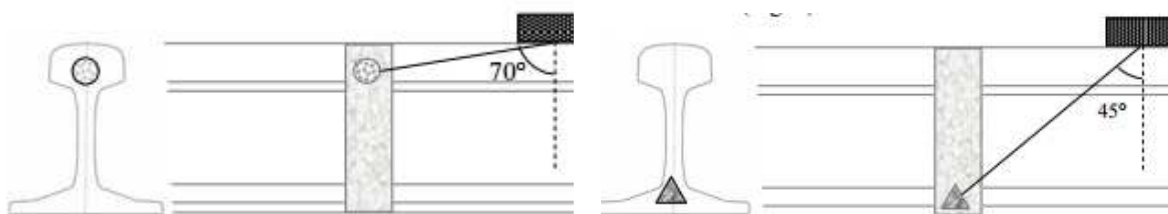
Slika 82: Kontrola geometrije zvara

(Marušić, 2009, str. 49)

3.5.1.3 Kontrola z ultrazvokom

Skladno s predpisi se vsak zvar pregleda z ultrazvokom, pri katerem se uporablja zvočno valovanje s frekvencami med 2 MHz in 2.5 MHz. Ultrazvočni pulz izvira iz ultrazvočne sonde, se prenese na preizkušane in se po njem širi, pri čemer se odbija na mejnih površinah, kot so površine preizkušanca ali nepravilnosti v njem. Od napake odbito ultrazvočno valovanje na ustrezen način zabeležimo in ga primerno ovrednotimo.

Običajno se za testiranje zvarov uporabijo ultrazvočne sonde z 45° in 70° lomnim kotom. Glede na evropski standard (SIST EN 14730-1:2007), se za testiranje zvarov v coni glave tirnice priporoča nihajna frekvenca 2 MHz pod kotom 70° (slika 83).



Slika 83: Pozicija ultrazvočne sonde za testiranje zvara v coni glave tirnice (levo) in v coni vratu ter noge tirnice (desno) v skladu z evropskimi standardi

(SIST EN 14730-1:2007)

Predvidene so tri možne ocene zvara: dober, dvomljiv, slab. Z oceno dober se ocenjuje zvar brez ugotovljenih napak, pri katerem ne pride do absorpcije zvoka, ki sicer nastopi pri grobozrnatni strukturi. Z oceno dvomljiv se oceni zvar, pri katerem je absorpcija zvoka tako velika, da se ne zazna odbojnega signala, pri čemer se ne ugotovi napak na poti zvoka. Zvar s to oceno je torej dober ali slab in ga je potrebno v dobi enega leta opazovati pri dnevni redni obhodu proge. Zvar, pri katerem se ugotovijo napake, se oceni kot slab. Tak zvar je potrebno izrezati iz tira in ga nadomestiti z novim.



Slika 84: Ročna ultrazvočna naprava s 45° kotno glavo

(Šemrov, 2012)

3.5.2 Porušne metode

V sodobnem času se z uvajanjem večjih hitrosti povečujejo tudi osne obremenitve na tirnice in tirnične spoje. S pojavom povečanih osnih obremenitev se povečujejo tudi zahteve glede kakovosti AT-zvarov. Kemična struktura zvarov se razlikuje od kemične sestave osnovnega materiala to je tirničnega jekla (vsebnost ogljika je manjša, več je mangana ter silicija pa tudi nekaj aluminija je prisotnega v zvarni strukturi). Približno 17 % vseh napak ki se pojavijo na tirnicah, se nanaša na AT-zvare. Od tod je kontrola tako uporabljenih materialov kot samega varjenja veliko obsežnejša. Laboratorijske preiskave testnih AT-zvarov obsegajo skladno s standardom (SIST EN 14730-1:2007) naslednje preiskave:

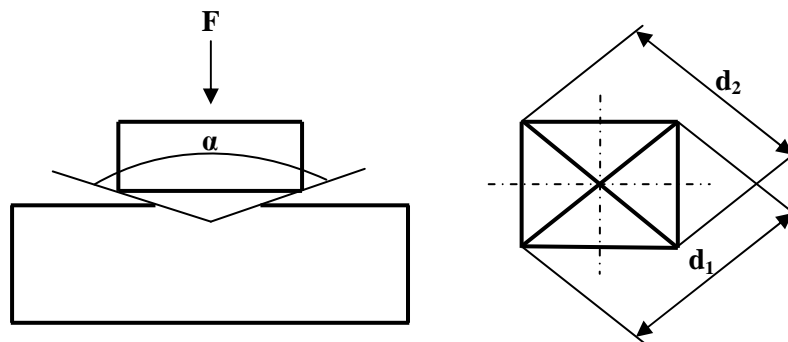
- preizkus trdote,
- upogibni preizkus,
- preizkus dinamične trdnosti.

3.5.2.1 Preizkus trdote zvara

Trdota je odpornost materiala proti vdiranju tujega telesa skozi njegovo površino. Ker je praktično nemogoče doseči, da bo trdota v coni zvara enaka trdoti tirnice, se teži k temu, da ima mesto zvara nekoliko večjo trdoto v primerjavi s tirnico. Preizkus trdote zvara se uporablja za prikaz porazdelitve trdote v osnovnem tirničnem materialu in zvaru. Na podlagi preizkusa trdote je možno oceniti kakšna je kakovost zvara. Toda zgolj in samo na podlagi preizkusa trdote ni mogoče z gotovostjo oceniti, kakšna je kakovost zvara, zato ta preizkus zgolj dopolnjuje ostale preizkusne metode. Podatki o trdotah na posameznih mestih definirajo mikrostrukturo in toplotno vplivno cono zvara (Saarna, Laansoo, 2004)

Glede na evropski standard (SIST EN 14730-1:2007) se trdota zvara meri po sledečih postopkih:

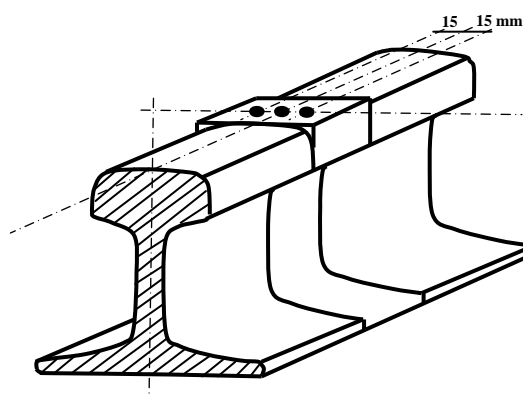
- po **Vickersu (HV30)**. Za vtiskovanje se uporablja štiristrana diamantna piramida s kotom α v vrhu 136° . Vtiskalno telo se vtiskuje s konstantno silo v površino preiskovanca in povzroči lokalno plastično deformacijo materiala. Rezultat se odčita na podlagi obeh diagonal vtiska. Primerno je, da merita diagonali d_1 in d_2 vsaj $20 \mu\text{m}$, da je rezultat dovolj natančen. Metoda je primerna za merjenje mikrotrdote (http://fs-server.uni-mb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA_UC/Mehanski_preskusi/merjenje_trdote.html (17.11.2012)).



Slika 85: Merjenje trdote po Vickersu

(http://fs-server.uni-mb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA_UC/Mehanski_preskusi/merjenje_trdote.html (17.11.2012))

- po **Brinellu (HBW 10/3000/15)**. Metoda zahteva, da se v površino zvara s silo 3000 kg vtisne kroglica iz karbidne trdine s premerom 10 mm. Sila se zvezno povečuje vsakih 15 s (brez udarca) do končne vrednosti. Zgornjo površino zvara je potrebno pred izvedbo preiskave obrusiti, s čimer se zagotovi ravnost površine (SIST EN 14730-1:2007).



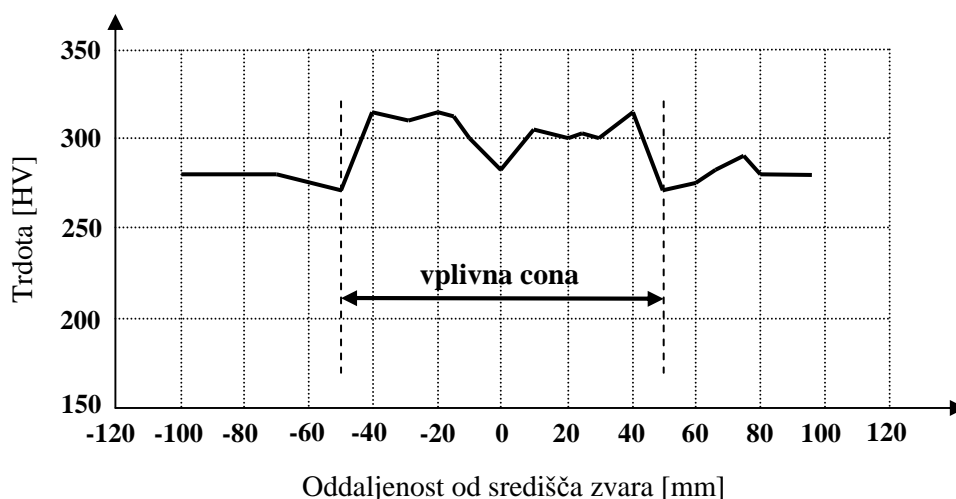
Slika 86: Pozicija merjenja trdote po Brinellu

(SIST EN 14730-1:2007)

Preglednica 10: Tolerančna območja površinske trdote AT-zvarov v skladu s standardom (SIST EN 14730-1:2007)

Vrsta jekla	Trdota tirnice (HBW)	Trdota v središču zvara (HBW)
R200	200 – 240	230 ± 20
R220	220 – 260	250 ± 20
R260	260 – 300	280 ± 20
R260Mn	260 – 300	300 ± 20
R320Cr	320 – 360	280 ± 20
R350HT	350 – 390	330 ± 20
R350LHT	350 – 390	350 ± 20

Rezultati meritev se prikažejo grafično v obliki grafa. Primer grafične ponazoritve trdote AT-zvara, pri varjenju zmerno trdih tirnic R260 tipa 60 E1 je prikazana na grafu 6. V sredini zvara se nahaja nekoliko mehkejša cona, pri čemer je potrebno paziti, da trdota na tem mestu ni manjša od trdote osnovnega tirničnega jekla. V prehodnih conah opazimo tudi nekoliko trša območja, ki so posledica koncentracije legirnih elementov na tem mestu. Na razdalji približno 50 mm od središča zvara se nahajajo mesta, na katerih prihaja do razogljivenja v osnovnem materialu, posledica tega pa je manjša trdnost. Navedenim razlikam se iz metalurških razlogov ni mogoče izogniti, vendar je potrebno težiti k temu, da so te čim manjše. Izkušnje so pokazale, da so se kot zelo dobri pokazali tisti zvari, pri katerih razlika v trdoti med osnovno tirnico in srednjo cono zvara ni prevelika (Marušić, 2009).

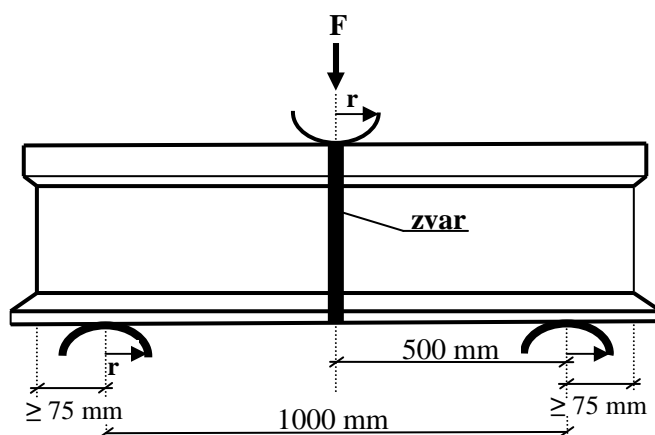


Graf 6: Vzdolžna distribucija trdote AT-zvara

(Marušić, 2009, str.54)

3.5.2.2 Statični upogibni preizkus

Uporablja se za določanje kakovosti zvara na podlagi analize rezultatov preizkusa. V skladu s standardom (SIST EN 14730-1:2007) se upogibni preizkus izvaja s pomočjo stiskalnice, kjer se zvarjeni spoj upogiba in lomi. Meri se obremenitev, ki deluje na sredino zvarnega spoja v trenutku loma. Maksimalna hitrost naraščanja obremenitve je 60 kN/s. Minimalna dolžina preizkušanca je 1150 mm, razdalja med podporama pa 1000 mm. Po poružitvi preizkušanca se na prelomni ploskvi vizualno in ultrazvočno preiskuje mikrostruktura zvara. Shema preizkusa v je prikazana na sliki 87.

Slika 87: Shema statičnega upogibnega preizkusa zvara (vrednost r je $25 \text{ mm} \leq r \leq 70 \text{ mm}$)

(SIST EN 14730-1:2007)

Sila, ki jo mora prenesti zvar preden se prelomi, je odvisna od prečnega prereza tirnice, ki se vari. Minimalne porušne upogibne sile tirnic, ki se zahtevajo, prikazuje preglednica 11.

Preglednica 11: Minimalne porušne upogibne sile tirnic različnih oblik (Technische Lieferbedingungen für aluminothermische Schweissungen)

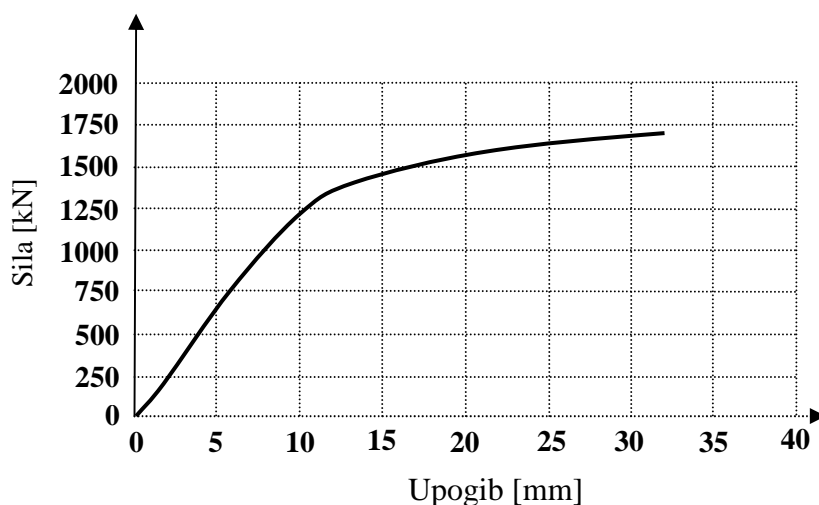
Tip tirnice	Minimalna zlomna sila F [kN]
60 E1	1130
54 E1	985
49 E1	745

Za kvaliteto zvara je izredno pomembno, kakšen povos se doseže pri preizkusu, ne da se pri tem pokažejo kakršnekoli poškodbe na zvarnem mestu.

Preglednica 12: Minimalni dovoljeni povosi pri različnih kakovostnih razredih tirnic (Technische Lieferbedingungen für aluminothermische Schweissungen)

Vrsta jekla	Minimalni povos [mm]
R200	15
R260Mn	13
R320Cr	10
R350HT	10

Primer takšnega statičnega preizkusa tirnice tipa 60 E1 s kakovostjo R320Cr je prikazan na spodnjem grafu:

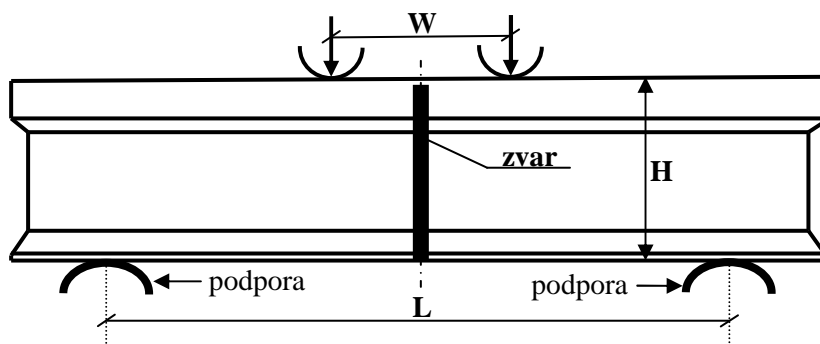


Graf 7: Rezultat statičnega upogibnega preizkusa

(Marušić, 2009, str. 50)

3.5.2.3 Dinamični preizkus trdnosti

Dinamični preizkus trdnosti se v skladu s standardom (SIST EN 14730-1:2007) izvede tako, da se tirnico izpostavi pulzaciji takšnih izmeničnih obremenitev, da se ta zagotovo zlomi pri nekem končnem številu izmeničnih obremenitev. Priporočljiva hitrost obremenjevanja znaša 60 ciklov na minuto (1 Hz) (Saarna, Laansoo, 2004). Obremenitve se izvajajo do porušitve vzorca oziroma dokler se en doseže 5×10^6 obremenitvenih ciklov.

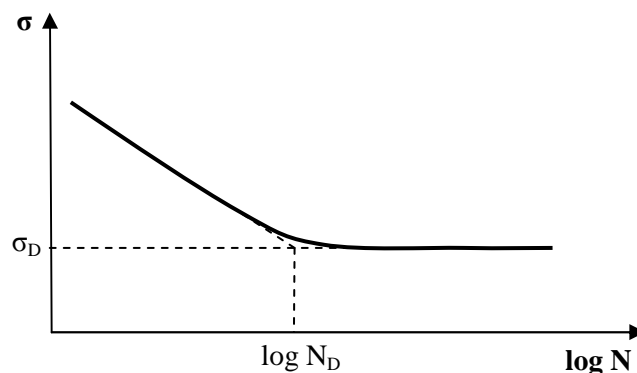


Slika 88: Shema dinamičnega preizkusa trdnosti

(SIST EN 14730-1:2007)

Obtežba vzorca je sestavljena točkovne obremenitve. Razdalja W znaša minimalno 150 mm. Razdalja med podporama L mora presegati vrednost W za najmanj dvakratno vrednost višine tirnice H , kar pomeni, da je $L \geq W + 2H$ (SIST EN 14730-1:2007).

Ker je trajnost materiala odvisna od števila nihajev obremenitve, se z zmanjševanjem amplitude napetosti σ_A pri dinamični obremenitvi povečuje število nihajev N , ki jih material prenese brez zloma. Odvisnost $\sigma_A = f(N)$ prikazuje Wohlerjeva krivulja (graf 8). Wohlerjeva krivulja se pri določenem številu nihajev N približa trajni dinamični trdnosti σ_D . Trajna dinamična trdnost je torej največja napetost σ_{max} , pri kateri se material pri kakršnem koli povečanju števila nihajev obremenitve ne zlomi več.



Graf 8: Wohlerjeva krivulja

V praksi se v materialu (zvarih) pojavljajo razpoke, ki pri neenakomernih obremenitvah hitro napredujejo. Zaradi razpok v materialu (zvarih) se dinamična trdnost močno zmanjša. Nemške železnice predpisujejo, da mora zvar zdržati 2×10^6 obremenitvenih nihajev, pri čemer ne smejo nastopiti niti najmanjši znaki porušitve.

3.6 Napetosti v zvarih

3.6.1 Varilne zaostale napetosti

Varilne zaostale napetosti niso posledica zunanjih mehanskih, toplotnih ali kakšnih drugih obremenitev. Nastanejo zaradi neenakomernosti mikrostrukture na zvarih in dejstva, da se ta mikrostruktura ne izoblikuje povsod v istem trenutku. Pogosto je to združeno z lokalno plastično deformacijo materiala.

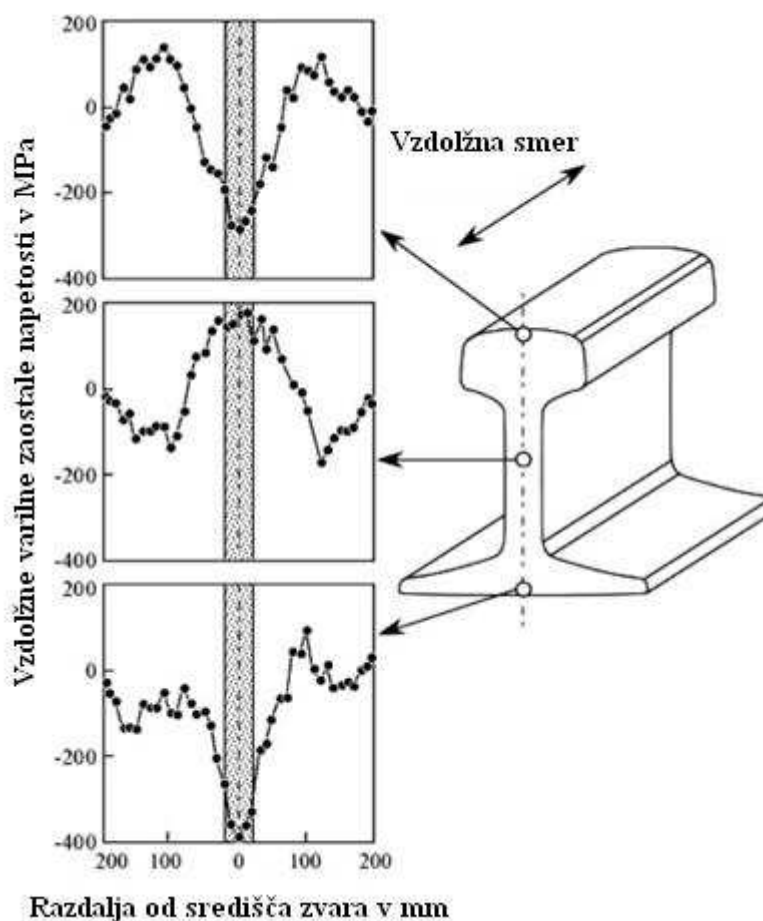
Če se po lokalni plastični deformaciji materiala ne spremeni kristalna zgradba, so zaostale napetosti posledica izključno te deformacije. Če pa gre za spremembo kristalne zgradbe materiala oziroma za premeno, so zaostale napetosti odvisne tudi od mikrostrukture.

Pri varjenju material lokalno hitro segrejemo. Meja tečenja kovine se z naraščajočo temperaturo znižuje. Zaradi oviranja temperaturnega raztezanja materiala se lahko ta plastično deformira. Pri ohlajanju se lokalno bolj segreti in pred tem plastično deformirani material zaradi okoliškega manj segretega materiala ne more toliko skrčiti kot bi bilo treba. Material se lahko spet plastično deformira. Zaradi lokalnosti plastične deformacije se pojavijo zaostale napetosti. Posledica nateznih zaostalih napetosti v enem delu zvara so tlačne zaostale napetosti v tistem delu, ki je raztezanje oviralo, in nasprotno. Raven varilnih zaostalih napetosti ponekod na zvarih doseže celo mejo tečenja materiala (Gliha, 2007).

Obstoj varilnih zaostalih napetosti ima negativni vpliv na trdnost zvarov pa tudi samo možnost varjenja močno ovira (Gliha, 2007).

- V interakciji z nekaterimi mediji ali kemijskimi elementi raztopljenimi v jeklu, povzročajo razpad materiala ali pokljivost zvarov.
- V lokalno prednapetih delih zvarov so skupne napetosti ponekod višje in pogosto bolj kompleksne od tistih, ki so posledica samo zunanjih obremenitev. Tako varilne zaostale napetosti vplivajo na napetostno stanje v zvarih in lahko občutljivost materiala na pojav krhkega loma zvečajo. Na ta način je statična trdnost zvarov manjša.
- Lokalno natezno prednapeti deli materiala zvarov ne prenesejo tako visokih cikličnih napetosti, kot če niso prednapeti. Zato so varilne zaostale napetosti pogosto vzrok za zmanjšanje ciklične trdnosti zvarov.

Slika 89 prikazuje potek vzdolžnih varilnih zaostalih napetosti v središču in v okolici AT-zvara. Raziskave so pokazale, da prihaja na območjih, ki so nekoliko oddaljene od središča zvara, v coni vratu tirnice do pojava tlačnih napetosti, medtem ko so v coni glave in noge tirnice napetosti pretežno tlačne. Bližje središču zvara so vzorci zaostalih napetosti zelo različni. Na zgornji in spodnji površini tirnice (glava in noga) v središču zvara so zaostale napetosti izrazito tlačne, kar je v splošnem prednost, saj na ta način zavirajo širjenje razpok zaradi utrujanja iz površine v notranjost tirnice. Na območju vratu tirnice so napetosti v središču zvara izrazito natezne, kar povečuje dovzetnost za nastanek in širjenje razpok, ki izvirajo iz notranjih materialnih napak na tem delu. Območja zaostalih napetosti ne sovpadajo z mejami zvarov, niti z mejami toplotno vplivnih območij (HAZ), vendar so v dobri koleraciji z dimenzijami oziroma dolžinami kalupa, ki ima v tem primeru izolacijski učinek.



Slika 89: Varilne zaostale napetosti vzdolž tirnice v okolici AT-zvara

(<http://www.sciencedirect.com> (18.1.2013))

Raven varilnih zaostalih napetosti, ki vplivajo na trdnost zvarov, je mogoče kontrolirati. Po varjenju je mogoče z različnimi toplotnimi in mehanskimi postopki zaostale napetosti precej znižati, popolnoma pa nikoli (Gliha, 2007). Deformacije, ki nastanejo kot posledica temperaturnih napetosti, se lahko pri izvedbi varjenja zmanjša z majhnim vnosom toplote, ki se uporablja za varjenje (na primer hitro AT-varjenje), s pravilno velikostjo zvarov in z enakomernim in počasnim ohlajanjem zvarov (Flerin, 2004).

3.7 Napake v alumotermijskih zvarih

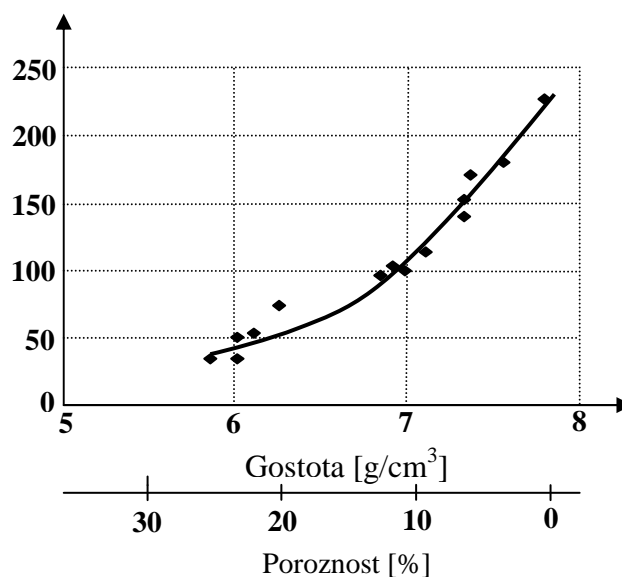
Napake na AT-zvarih se lahko pojavijo med ali po končanem postopku varjenja in lahko povzročijo pojav zgodnjih poškodb na tirnici, ki lahko vodijo celo do iztirjenja vlaka in motenj železniških storitev, ter povečanja stroškov na železniškem omrežju. Na območju Evrope se letno izdelata približno 300.000 do 400.000 novih AT-zvarov (na progah je približno 11 milijonov AT-zvarov). Čeprav je napak na varjenih stikih sorazmerno malo, te še vedno obsegajo 20 % vseh napak, ki se pojavijo na tirnicah, kar pomeni več sto napak na območju zvarov letno. Najpogostejše volumetrične napake v AT-zvarih so krčenje, vključki žindre, nepopolno taljenje in poroznost (slika 90) in lahko vodijo do popolne odpovedi zvara (zlom, razpoke) (<http://www.railect.com/> (15.11.2012)).



Slika 90: Najpogostejše napake v AT-zvarih, in sicer od leve proti desni: poroznost, nepopolno taljenje, krčenje zvara

(Colombier, 2010, str. 25)

Poroznost je najbolj pogosta težava AT-varjenja in na zunanji površini zvara ponavadi ni vidna. Če je prisotno veliko število por (plinastih vključkov), se trdnost zvara lahko bistveno zmanjša. Poroznost povzroča nastanek notranjih razpok in širjenje teh po prerezu tirnice. Zaradi razpok se dinamična trdnost zvara močno zmanjša, kar je razvidno iz grafa 9. Ugotovljeno je bilo, da je poroznost najbolj škodljiva na globini 15 mm pod vozno površino tirnice.



Graf 9: Poroznost in dinamična trdnost

(Chen, Lawrence, 2001, str. 6)

Poroznost v AT-zvarih je posledica enega ali več od naslednjih dejavnikov(15.2.2013)):

- neustrezno ali nezadostno predgretje stika,
- napačna varilna porcija glede na vrsto tirnice,
- prisotnost vlage ali umazanije v kalupu,
- varjenje v dežju.

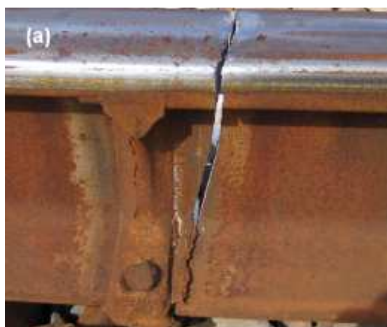
Razpoke ogrožajo uporabnost in varnost zvarjenih izdelkov. Vzrok je obstoj interakcije med napetostmi in razpokami, ki so neugodno orientirane. Razpoke vplivajo na nosilnost varjene konstrukcije in zmanjšajo trajnost pri cikličnih obremenitvah (Gliha, 2007).

Primarni vzroki za pojav pokljivosti zvarov (Gliha, 2007):

- napetosti, ki so posledica predelave kovin, ko so nekateri vplivi lokalnega značaja (hladna deformacija pri upogibanju, fazne transformacije pri različnih hitrostih ohlajanja na površini in v jedru pri kaljenju in vnašanje toplote pri varjenju, brušenju itd),
- spremembe lastnosti materialov zaradi varjenja (pomembna je hitrost segrevanja, najvišja dosežena temperatura, čas zadrževanja na tej temperaturi, hitrost ohlajanja),
- drugo (raztapljanje vodika v zvarni talini, kemična sestava in način predelave materiala, parametri varjenja, termična obdelava po varjenju).

Glavni dve vrsti zlomov AT-zvarov sta prečni oziroma navpični zlom in horizontalni zlom oziroma tako imenovani S-zlom (angl. horizontal split web). Že posledice ene same takšne poškodbe na zvarnem mestu so lahko izjemno tragične, kot na primer iztirjenje vozila in izguba človeških življenj ter več milijonov evrov škode (<http://www.railect.com/> (15.11.2012)).

Prečni zlom v AT-zvaru (slika 91) praviloma nastane kot posledica manjših razpok, ki izhajajo iz spodnjega dela zvara (noge zvara). Napake so lahko posledica nehomogenosti v zvarnem spoju, notranjih varilnih napetosti, nepopolnega taljenja ali pa geometrijskih napak na zvarnem spoju. Poškodovano tirnico je potrebno zavarovati s spojko in jo opazovati ali zamenjati, če napaka povzroča ugrezanje vozne površine. Če je tirnica na področju zvara v celoti prelomljena, jo je potrebno takoj zavarovati s spojko in poškodovano mesto sanirati na način, da se poškodovani zvar izreže in nadomesti z novim. Če je poškodba večjega obsega, je potrebno poškodovani del izrezati ter vstaviti nov kos tirnice in ponovno zavariti.



Slika 91 : Prečni zlom v AT-zvaru, ki izvira iz spodnjega dela zvara (noge zvara)
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112311001125> (13.1.2013))

Horizontalni prelomi so relativno pogost pojav v AT-zvarih (slika 92). Faktorji, ki vplivajo na pojav tovrstnih prelomov so povezani s cikličnim pojavljanjem torzijskih napetosti v vratu tirnice na območju krivin s polmerom 600–900 m. Analiza horizontalni prelomov je pokazala, da je na prelomni ploskvi mogoče zaznati napake, ki izvirajo iz notranjosti AT-zvarov, kot so vključki žlindre, krčenje, poroznost itd. Prav našteje napake predstavljajo izvor manjših razpok, ki se pod vplivom zunanje obtežbe širijo, kar kasneje vodi do zloma (Offereins, Muton, 2001). Poškodovano mesto je potrebno zavarovati z začasno spojko, tirnico pa v najkrajšem možnem času zamenjati oziroma poškodovano mesto izrezati, vstaviti nov kos tirnice in ponovno zavariti.



Slika 92: Horizontalni zlom, ki izvira iz srednjega dela (vratu) AT-zvara

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112311001125> (13.1.2013))

Poškodbe, ki se pojavljajo na tirnicah in zvarnih mestih so številčnejše v zimskih mesecih, ko se temperature občutno znižajo, zaradi česar se žilavost materiala zmanjša. Vse večje hitrosti in osne obremenitve na progah so prav tako razlog pojava poškodb. Dejavniki, ki vplivajo na trdnost in vzdržljivost AT-zvarov so sledeči (Aluminothermic Weld Defects, 2006):

- nepravilno izvedena dilatacija,
- nepravilna uravnava stika pred varjenjem,
- tirnice niso predgrete na ustrezno temperaturo,
- uporaba zastarelih varilnih porcij,
- neustrezna kemična sestava varilnih porcij,
- nestrokovnost varilcev,
- varjenje pri neustreznih vremenskih pogojih,
- neustrezna obdelava zvara.

4 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem podrobneje predstavil področja, ki se nanašajo na tirnico in na ta način prikazal njeno vlogo in pomen v zgornjem ustroju železniških prog. Poleg tega sem v sklopu diplomskega dela podrobneje proučil pogoje za gradnjo neprekinjeno zavarjenega tira, kot jih določa Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010), ter opisal in predstavil ključne elemente alumotermisjkega varjenja tirnic.

Na začetku diplomske naloge sem definiriral in opisal karakteristike tirnic, ki so se skozi stoletja spreminjale. Za njihove mehanske lastnosti so se vedno znova postavljale strožje zahteve. Posledica tega je, da poznamo danes več tipov tirnic, ki se med seboj ločijo po dimenzijah prečnega prereza in vrsti jekla. Izbira je po priporočilih UIC-kodeksa odvisna od polmera krivine in prometne obremenitve proge. Po novem evropskem standardu EN 13674-1:2003 je za klasifikacijo tirnic pomembna izključno njihova trdota po katerem se tirnice klasificira v 7 kakovostnih razredov.

Definiral sem napetosti v tirnici, ki so posledica različnih faktorjev. Pri izpeljavi enačb za določanje upogibnih napetosti v nogi tirnice, sem uporabil Zimmermannovo metodo, ki je danes med najbolj uveljavljenimi metodami v svetu. Velikost upogibnega momenta, ki ga v tirnici povzroča posamezna statična kolesna sila Q , je odvisna od velikosti te sile, odpornostnega momenta tirnice, profila tirnice, razmaka in naležne površine pragov, ter od stanja spodnjega ustroja in tirne grede. Njegova največja vrednost nastopi v prijemališču sile Q . Pri delovanji več sil, je vrednost upogibnega momenta in posledično upogibnih napetosti praviloma manjša od momenta, ki nastopi pri posamični sili. Pri dinamični obremenitvi je velikost upogibnega momenta in posledično upogibnih napetosti odvisna od velikosti dinamičnega koeficienta, ta pa je posredno odvisen od hitrosti tirnih vozil in od stanja zgornjega ustroja. Velikost tangencialnih napetosti v glavi tirnice je na podlagi izpeljanih enačb, odvisna predvsem od polmera kolesa tirnega vozila. Dopustna osna obremenitev proge je neposredno odvisna od dopustnih upogibnih napetosti v nogi tirnice in dopustnih obremenitev tirnične glave. Na tem mestu je potrebno poudariti, da bo pri tirnicah nižje kakovosti, za določitev dopustne obremenitve proge ključna napetost v tirnični glavi, medtem ko bo pri tirnicah z višjo kakovostjo, ključna upogibna napetost v nogi tirnice. Maksimalne vrednosti zaostalih napetosti dosežajo vrednosti od 10.000-30.000 N/mm², pri čemer so v vratu tirnice izrazito tlačne, v nogi tirnice pa izrazito natezne narave.

Pojav valovitosti vozne površine se pojavlja v vseh pogojih geometrije tira, vrstah vleke in tirnic, intenzivnosti prometa in klime, kar pomeni da pojav valovanja ni pogojen zgolj samo z vrsto tirničnega jekla, postopkom proizvodnje ter obremenitvami na progi, zato lahko z zagotovostjo trdimo da gre za zelo specifičen pojav, na katerega vpliva več faktorjev. Pri ostalih poškodbah, ki so navedene

v diplomskem delu, lahko z zagotovostjo trdimo, da so posledica kontaktnega utrujanja materiala na mestih, kjer so dinamični učinki na tirnico največji. Zaradi hitrega širjenja tovrstnih napak je njihovo pravočasno odkrivanje z ultrazvočnimi napravami in odstranjevanje s tehnikami brušenja in navarjanja ključnega pomena. Na tem mestu bi poudaril pomen preventivnega brušenja, ter brušenje asimetričnih profilov, ki postaja stalna praksa predvsem v nekaterih tujih državah. Omenjene napake se pojavljajo pri vseh geometrijskih elementih prog, medtem ko je obraba tirnic izrazitejša v krivinah z majhnimi polmeri. Uspešna rešitev na tem področju je vgradnja sodobni tirnih mazalk, kot je to naprava CL-E1, podjetja Elpa d.o.o., ki bistveno reducira obrabo in hrup. Tudi vgradnja trših tirnic je ena izmed možnih rešitev.

Pri alumotermijskem varjenju tirnic, bi izpostavil pomembno vlogo ustrezne predhodne priprave in uravnave stika, s čimer se zagotovi dimenzijsko ustreznost zvara. Pri predgrevanju je pomembno, da se oba konca tirnic predhodno segreje na ustrezno temperaturo, ki znaša približno 1000 °C, s čimer zagotovimo ustrezno temperaturo tirnic in stikov. Uporaba varilnih loncev za enkratno uporabo je vsekakor smiselna in priporočljiva. Poleg alumotermijskega postopka sem predstavil tudi pogoje za gradnjo in varjenje tirnic v neprekinjeno zavarjeni tir. Pri tem je ključnega pomena, da se dosledno upošteva vse pogoje, ki jih v tem zvezi določa Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (2010). Potrebno je poudariti, da lahko gradnja neprekinjeno zavarjenega tira poteka le pri ustrezno urejenem in stabiliziranem spodnjem ustroju proge. Pri sproščanju tirnic in končnem varjenju je potrebno striktno upoštevati ustrezne temperature, pri katerih se ti procesi lahko izvajajo. V nasprotnem primeru, lahko pride zaradi velikih notranjih sil, ki so posledica temperaturnih sprememb do izbočenja oziroma do pretrga tira. Za vsako spremembo temperature za 1°C, se namreč napetost v tirnici spremeni za 241 N/cm². Glede na temperaturni interval v katerem se gibljejo temperature na našem klimatskem področju, to je od -30 °C do +65 °C in največjo možno temperaturno razliko v tirnici, lahko napetosti v mirujočem delu neprekinjeno zavarjenega tira, dosežejo vrednosti preko 10.000 N/cm². Vzdolžne sile, ki pri tem nastanejo v tiru so zelo velike in jih potrebno na ustrezen način obvladati, kar omogoča le pravilno izvedena gradnja, ki je v tem delu diplomske naloge tudi podrobneje definirana.

VIRI

Brčić, S. 2011. Mehanika vožnje. Odsek za puteve, železnice i aerodrome. Beograd, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet: 153 str.

<http://www.grf.bg.ac.rs/mm/files/learnmat/45MV-L4.pdf> (Pridobljeno 6. 2. 2013.)

Chen, Y., Lawrence, F. V. 2001. Porosity in Thermite Welds, Civil and Environmental Engineering Department, University of Illinois at Urbana-Champaign: 18 str.

<http://fcp.mechse.illinois.edu/media/pdfs/Chen%20presentation.pdf> (Pridobljeno 12. 1. 2013.)

Colombier, T. 2010. Development of an ultrasonic technique, sensors and systems for the volumetric examination of aluminothermic welds, Cambridge: 35 str.

<http://www.railect.com/publication/files/RAILECT-18th%20IORW-1st%20December2010.pdf>

(Pridobljeno 20. 2. 2013.)

Flerin, G. 2004. Infrastrukturno vzdrževanje tirnic s postopki varjenja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (samozaložba G. Flerin): 107 f.

Gliha, V. 2007. Fizikalno-metalurške osnove varjenja. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo: str. 89–91.

Grohman, H., Schnitzer, T. Head Checks und was daraus noch werden kann, EI-Eisenbahningenieur 1/2003: 32–36.

Gspan, J. 1962. Železnice II. Zgornji ustroj železnic. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 187 str.

Hartleben, D.. Schienenschleifen als Massnahme der Lärmvorsorge und Lärmsanierung, EI-Eisenbahningenieur 8/2003: str 22–28.

Kostiov, L. 2009. Razvoj naprave CL-E1 za mazanje tirnic. Nova proga, Revija Slovenskih železnic 2/2009: 20–22.

Kožuh, S. 2010. Specialni čelici. Sisak, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet: 126 str.

Lonsdale, C. 1998. Thermite rail welding: history, process developments, current practices and outlook for the 21st century, Conrail technical services laboratory, Altoona, Pennsylvania: 18 str.

http://www.arena.org/files/library/1999_Conference_Proceedings/00059.pdf (Pridobljeno 14.2.2013.)

Lothar, F. 2006. Eisenbahninfrastruktur, Handbuch, Großbeeren: 967 str.

http://books.google.si/books?id=sITdFWB2mVEC&printsec=frontcover&hl=sl&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Pridobljeno 10. 12. 2012.)

Marušić, D. 2009. Gornji ustroj željeznica, Predavanja za studente diplomskog studija, Gradževinski fakultet sveučilišta u Mostaru: 67 str.

http://www.gfmo.ba/gornji_ustroj_zeljeznica_mostar.pdf (Pridobljeno 16. 11. 2012.)

Milojković, T. 1986. Gornji stroj železnica. Beograd, Zavod za novinsko – izdavačku i propagandnu delatnost na JŽ: 236 str.

Offereins, G.A, Mutton, P.J. 2001. Recent Experiences with the Performance of Aluminothermic Rail Welds under High Axle Loads, Principal Reserch Fellow, BHP Institute of Railway Technology, Monash University: 13 str.

<http://www.cituk-online.com/acatalog/alumino2.pdf> (Pridobljeno 17. 11. 2012.)

Pletikosić, R., Pletikosić, Ž. 2009. Modeliranje habanja tribosistema točak-šina. Novi Sad. Univerzitet u Beogradu, Fakultet tehničkih nauka: str 319–323.

<http://tribolab.mas.bg.ac.rs/proceedings/2009/319-323.pdf> (Pridobljeno 4. 4. 2013.)

Popović, O., Prokić-Cvetković, R., Grabulov, V., Odanović, Z. 2006. Izbor punjenih žica za navarivanje železniških šina. Beograd: str 131–132.

http://www.duzs.org.rs/casopis_files/abstracts/2006/2006-04_abs/131_04-2006.pdf (Pridobljeno 5. 3. 2013.)

Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, Uradni list RS, št. 92/2010.

Priročnik za varjenje št. 121. 2010. Postopek aluminotermičnega varjenja tirnic. Popravljen izdaja št. 4. Railtech international, Gennevilliers: 25 str.

Saarna, M., Laansoo, A. 2004. Rail and rail weld testing, Mechanical Testing and Calibration Laboratory of Department of Materials Engineering, Tallinn University of Technology: str 218–219.

<http://innomet.ttu.ee/daaam04/proceedings/Engineering%20Materials/Saarna.pdf> (Pridobljeno 12. 2. 2013.)

Schoech, W. 2007. Grinding specific profiles helps solving rail problems, Speno International SA, Geneva: 7 str.

<http://www.speno.ch/pdf/RailwayEngineering2007.pdf> (Pridobljeno 2. 12. 2012.)

Štefotič, B. 1970. Varjenje tirnic v dolge tirne trakove. Glasilo društva za varilno tehniko SRS, zavoda za varjenje SRS in zveze društev za varilno tehniko SFRJ 19, 4: 93–98.

Vidmar, P. 2003. Materiali in varjenje v pomorstvu, Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet: str 7.

www.fpp.uni-lj.si/mma_bin.php?id=2011111018373383 (Pridobljeno 5. 4. 2013.)

Zabukovec, M., Grum, J., Polajnar, I. in Zgonik, M. 2003. Aluminotermično varjenje železniških tirnic. Varilna tehnika, Glasilo Zveze društev za varilno tehniko Slovenije 52, 1: 11–14 str.

Zaletelj, M., Flerin, G. 2006. Sodobni trendi pri posodabljanju in vzdrževanju železniške infrastrukture z uporabo "LCC" metode. Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 12 str.

Zgonc, B. 2010. Napetosti v železniških tirnicah zaradi temperaturnih sprememb. Gradbeni vestnik 59: 291–302.

Zgonc, B. 2012. Železniška infrastruktura. Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet: 222 str.

Zgonc, B. 2011. Sile in napetosti v zgornjem ustroju f 24.

Elektronski viri

Rail grinding necessity on indian railway
http://wiki.ircen.gov.in/doku/lib/exe/fetch.php?media=625:3rail_grinding.pdf
(Pridobljeno 15. 2. 2013.)

HSG High Speed Grinding
<http://www.vossloh-rail-services.com/media/en/downloads/pdfs/prospekte/.pdf>
(Pridobljeno 23. 2. 2013.)

Obnova železniške pruge brušenjem tračnica
http://www.mav-thermit.hu/index.php?lang=hr_HR&oldid=2.7&product=86
(Pridobljeno 16. 11. 2012.)

THERMIT® welding method for flat bottom rails
<http://www.elektro-thermit.de/de/download/SKV.pdf>
(Pridobljeno 5. 3. 2013.)

Crucible systems for the THERMIT® reaction
http://www.elektro-thermit.de/wp-content/uploads/2012/01/Tiegelsysteme_final1.pdf
(Pridobljeno 3. 3. 2013.)

Definitive guidelines on the use of different rail grades
http://www.innotrack.net/IMG/pdf/d415-f3-railgrade_selection.pdf
(Pridobljeno 3. 4. 2013.)

Aluminothermic weld defect
<http://www.wtia.com.au/docs/default-source/free-downloads---isp-rail/tgn-r-04-aluminothermic-weld-defects.pdf?sfvrsn=4>
(Pridobljeno 15.1.2013.)

Standardi in specifikacije

EN 13674-1:2003. Railway applications – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.

SIST EN 14730-1:2007. Železniške naprave – Zgornji ustroj – Aluminotermično varjenje tirnic – 1. del: Odobritev varilnega postopka.

UIC 860 V:1986. Technische Lieferbedingungen für Schienen.

SEZNAM PRILOG

- Priloga A: Opisni list zvara
- Priloga B: Obrazec za pregled in kontrolo zvarov
- Priloga C: Obrazec za sproščanje tira

Priloga A: Opisni list zvara



OP - 9

Datum: 18.9.2006

OPISNI LIST ZVARA št.

Medpostajni odsek:		tir (L/D/št.)	
Postaja:		postajni tir (št.)	
datum:		kretnica (št.):	
temperatura v tirnici:		kretniška zveza:	
splošni podatki			
tip in kvaliteta tirnice:		varilec:	
proizvajalec tirnice:		varilna skupina:	
varilna oprema			
serija:		<i>nalepka</i>	
kalup:			
porcija:			
proizvajalec:			
datum izdelave:			
		predpisano	dejansko
uravnavanje stika			
dopustna napaka v višini in širini tirnice (mm):			
varilna reža (mm):	- glava 1:		
	- peta 2:		
	- glava 3:		
	- peta 4:		
predgrevanje			
gorilnik (število lukenj)			
razdalja med koncem odprtine gorilnika in vrhom tirnice (mm):			
dolžina gumijaste cevi za propan in kisik (m):			
višina plamena od zgornjega roba kalupa (mm):			
dolžina plavega plamena (mm):			
čas predgretja (minute):			
pritisek propana (bar):			
pritisek kisika (bar):			
priprava in centriranje lonca			
čas ogrevanja lonca (minute) - prvi zvar			
čas ogrevanja lonca (minute) - vsi naslednji zvari			
razdalja med dnom lonca in vrhom kalupa (mm):			
razkalupljanje po vlivanju			
odstranjevanje posode za žlindro in izlivne posode (min):			
odstranjevanje zgornjega dela kalupa ter stranske in osnovne plošče (min):			
obrezovanje po vlivanju			
izvedba obrezovanja (min):			
OPOMBE			
testiranje zvara			
datum:	pooblaščenca institucija	št. poročila	

Varilec: _____ Vodja CDO: _____ Nadzor: _____

Holding Slovenske železnice d.o.o.

Sekcija za vzdrževanje prog Ljubljana

Organizacijska enota: ZALOG

PREGLED IN KONTROLA ZVAROV

Pravilnik o pogojih za proj., gradnjo in vzdrževanje ZU železniških prog: čl.63 tč.3, čl.75 tč.5

Vizuelna, smerna in višinska ureditev ter ultrazvočna kontrola termitskih zvarov na tirnicah na

odseku proge: Dobova-Ljubljana od km do km

Progovni odsek:

tiru:

kretnici

Varjenje izvajale varilne skupine:

Zvar štev.	km	LEVI TRAK			Zvar štev.	km	DESNI TRAK				
		Vizuelni pregled Dop.toleranca	Smern ± mm	Višina ± mm			Vizuelni pregled Dop.toleranca	Smern ± mm	Višina ± mm		
		0,00/-0,3		0,35/-0,2			0,00/-0,3		0,35/-0,2		

Ukrepi

kd	Zvari s površinskiimi napakami
kd	Smerno in višinsko neustrezni
kd	Ultrazvočno neustrezni zvari
kd	Sunljivo zvari-opazovanje 1 leto
kd	Skupaj pregledanih zvarov

350.1.00.13.1.1.2005.0

Pregledali:

- 1.
- 2.
- 3.

