



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ГРАЂЕВИНСКО-АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ



Ненад В. Стојковић

**ИСТРАЖИВАЊЕ ПОНАШАЊА
АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА МЕТАЛНИХ
КОНСТРУКЦИЈА ПОД ДЕЈСТВОМ
СТАТИЧКОГ И ЦИКЛИЧНОГ
ОПТЕРЕЂЕЊА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Текст ове докторске дисертације ставља се на увид јавности,
у складу са чланом 30., став 8. Закона о високом образовању
("Сл. гласник РС", бр. 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 44/2010,
93/2012,
89/2013 и 99/2014)

НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:

Овај текст сматра се рукописом и само се саопштава јавности (члан 7. Закона о
ауторским и
Сродним правима, "Сл. гласник РС", бр. 104/2009, 99/2011 и 119/2012).

**Ни један део ове докторске дисертације не сме се користити ни у какве сврхе,
Осим за упознавање са њеним садржајем пре одбране дисертације.**

Ниш, 2017.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND
ARCHITECTURE



Nenad V. Stojković

**INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF
ADHESIVE JOINTS IN METALLIC
STRUCTURES SUBJECTED TO STATIC AND
CYCLIC LOADING**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2017.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор: Гордана Топличић Ћурчић

Наслов: Истраживање понашања адхезионих спојева металних конструкција под дејством статичког и цикличног оптерећења

Резиме: Адхезиони спојеви пружају бројне погодности које могу да надокнаде одређене недостатке традиционалних метода спајања у металним конструкцијама. Њихова шира употреба ограничена је недостатком одговарајућих стандарда за испитивање и прорачун овој области примене. Пут до стандардизације подразумева опсежна експериментална испитивања њиховог понашања у различитим експлоатационим условима. Поред избора геометрије и процеса израде споја, као и ефеката повишене температуре и влажности ваздуха, највећи утицај на понашање адхезионих спојева има врста оптерећења којој су изложени.

Основни циљ докторске дисертације је био да се применом савремених експерименталних и нумеричких метода истражи и опише понашање адхезионих спојева при дејству статичког и цикличног оптерећења, изврши одабир методе обраде површина адхерената пре спајања и формулишу модели и поступци за описивање и предвиђање њиховог понашања у условима карактеристичним за примену у грађевинским конструкцијама. Спроведено је експериментално испитивање утицаја статичког и цикличног оптерећења на два карактеристична типа адхезионих спојева лаких металних конструкција: фасадни спој трапезастог лима и прикључног Т-профила и двоструки преклопни спој. На основу резултата спроведених испитивања, као и експерименталних резултата из доступне литературе, формулисани су модели и методе којима је могуће описати и предвидети њихово понашање под дејством статичког и цикличног оптерећења.

Научна област: Грађевинарство

Научна дисциплина: Грађевински материјали и конструкције у грађевинарству

Кључне речи: адхезиони спојеви, металне конструкције, статичко оптерећење, циклично оптерећење, замор

УДК: 624.014:[624.078:624.042.2/.8(043.3)]

CERIF класификација: T220 Грађевинарство, хидраулика, приобална технологија, механика тла

Тип лиценце Креативне заједнице: **CC BY-NC-ND**

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Gordana Topličić Ćurčić
Title:	Investigation of the behavior of adhesive joints in metallic constructions subjected to static and cyclic loading
Abstract:	<p>Adhesive joints offer many advantages compared to the traditional joining techniques in metallic structures. However, the lack of unified design standards and procedures limit their wider use in civil engineering industry. For the purpose of standardization, extensive experimental work has to be done on investigating their behavior under the service conditions. Besides the influence of the joint geometry, the manufacturing process and the temperature and humidity effects, type of the loading has the greatest influence on the behavior of adhesive joints. Main goal of this dissertation was to investigate behavior of adhesive joints in metallic structures under static and cyclic loading, using modern experimental and numerical methods. In order to achieve this the selection of proper adherent surface preparation procedure was necessary.</p> <p>Experimental investigation of the behavior of adhesive joints subjected to static and cyclic loading was conducted on two types of adhesive joints: galvanized steel façade joint and double lap shear joint. Based on the results of the experimental investigation, as well as the results from the literature, new models and methods were developed for modeling of the behavior and predicting the fatigue life of adhesive joints subjected to static and cyclic loading.</p>
Scientific Field:	Civil engineering
Scientific Discipline:	Civil engineering materials and structures
Key Words:	Adhesive joints, metallic structures, static loading, cyclic loading, fatigue
UDC:	624.014:[624.078:624.042.2/.8(043.3)
CERIF Classification:	T220 Civil engineering, hydraulic engineering, offshore technology, soil mechanics
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND



Предговор

Ова дисертација је резултат вишегодишњег истраживања у области адхезионог спајања металних конструкција, уз континуирану сарадњу са професорима Грађевинско-архитектноског факултета Универзитета у Нишу и Катедре за челичне и дрвене конструкције Грађевинског факултета Бранденбуршког техничког универзитета, Немачка. Ова сарадња је остварена у оквиру пројекта SEEFORM (South Eastern European Graduate School for Master and Ph.D. Formation in Engineering), финансираног од стране German Academic Exchange Service - DAAD.

Највећи део експерименталних резултата који су приказани у овој дисертацији представљају саставни део пројекта IGF-Nr. 18161 BG - Untersuchungen zum Tragverhalten und der Lebensdauer von Klebverbindungen im Stahlbau unter zyklischer Belastung. Аутор је имао прилику да узме активно учешће у експерименталном истраживању које је спроведено у оквиру овог пројекта.



Захвалност аутора

Желим да изразим дубоку захвалност Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak-у на коменторству и свестраној подршци при изради ове докторске дисертације. Захваљујем му се и на омогућеним условима за продуктиван рад и осећају припадности током истраживачких боравака у Немачкој.

Најискреније се захваљујем ментору, проф. др Гордани Топличић Ђурчић, на продуктивној сарадњи и пруженој подршци у тренуцима када је то било најпотребније.

Посебно се захваљујем проф. емер. др Радомиру Фолићу на снажном утицају на мој развој као истраживача, као и на посвећености у преношењу дугогодишњег искуства методолошког приступа и научног изражавања, веома значајним саветима приликом израде ове докторске дисертације и великом разумевању.

Велику захвалност дугујем проф. др Драгославу Стојићу на његовој улози у покретању SEEFORM пројекта и мотивацији за учешће у истом, без чега ова дисертација не би постојала, као и дугогодишњој подршци и усмеравању.

Захваљујем се др Срђану Живковићу на веома корисним саветима и подстицању мог интересовања за област металних конструкција.

Истраживачки бораваци у Немачкој су били веома продуктивни, пре свега јер сам се у друштву колега са Катедре за челичне и дрвене конструкције Грађевинског факултета Бранденбуршког техничког универзитета, осећао као код куће. Хвала вам на томе: Samer Sahellie, Lukás Ledecký, Benjamin Launert, Yvonne Ciurack, Susanne Bartholomé, Agnieszka Chwastek, Thomas Krausche, Zheng Li, Birgit Ragotzky.

Захваљујем се колегама са SEEFORM пројекта: Немањи Марковићу, Мирославу Марјановићу, Марку Радишићу, Симони Богоевској и Фатосу Тахирију; јер сам се сваког нашег окупљања враћао кући са додатном енергијом да останем на путу којим сам кренуо.

Посебну захвалност желим да искажем колегама са Високе техничке школе Петру Бекићу, др Биљани Милутиновић и др Младену Томићу на жучним, али конструктивним, расравама и константној подршци при изради ове дисертације. Такође, захвалио бих се др Дејану Благојевићу, др Александри Боричић, др Драгану Перићу и Милану Протићу на великој помоћи и омогућавању услова за несметани рад на изради ове дисертације.

Неизмерно се захваљујем се родитељима Владимиру и Живани и брату Миши на несебичној подршци, разумевању и томе што су веровали у мене свих ових година.

Захваљујем се, и уједно извињавам, својој супрузи Данијели и сину Лазару на огромној жртви коју су поднели чекајући моје повратке са истраживачких боравака у Немачкој. Хвала им што су били мој неусисрпни извор снаге и давали смисао сваком мом напору. Носећи их у срцу, ма где се налазио, увек сам био код куће. Ову дисертацију посвећујем њима.

У Нишу, јуна 2017.

Ненад Стојковић



САДРЖАЈ:

СПИСАК СЛИКА	vi
СПИСАК ТАБЕЛА	xi
1 УВОД	1
2.1 ПРЕДМЕТ И ПРОБЛЕМ ИСТРАЖИВАЊА	1
2.2 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА	3
2.3 ПРИМЕЊЕНА МЕТОДОЛОГИЈА	4
2.4 СТРУКТУРА РАДА	5
2 АДХЕЗИОНО СПАЈАЊЕ	7
2.1 ИСТОРИЈА АДХЕЗИВА И АДХЕЗИОНОГ СПАЈАЊА	7
2.2 ВРСТЕ АДХЕЗИВА	8
2.3. АДХЕЗИВИ КОЈИ СЕ ПРИМЕЊУЈУ ЗА КОНСТРУКЦИЈЕ (КОНСТРУКЦИЈСКИ АДХЕЗИВИ)	8
2.4 ИЗБОР АДХЕЗИВА	9
2.5 ПРЕДНОСТИ И НЕДОСТАЦИ АДХЕЗИОНОГ СПАЈАЊА	10
2.6 ВРСТЕ СПОЈЕВА	13
2.7 МЕХАНИЗМИ ЛОМА АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА	14
2.8 ИЗРАДА СПОЈЕВА	15
2.8.1 ПРИПРЕМА ПОВРШИНА	16
2.8.2 ПРИПРЕМА И НАНОШЕЊЕ АДХЕЗИВА	18
2.8.3 ОЧВРШЋАВАЊЕ	20
2.8.4 КОНТРОЛА КВАЛИТЕТА	20
2.9 ПРИМЕНА АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА	20
2.9.1 ПРИМЕНА У ГРАЂЕВИНАРСТВУ	22
2.9.2 ПРИМЕНА У МЕТАЛНИМ КОНСТРУКЦИЈАМА У ГРАЂЕВИНАРСТВУ	22
3 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ И ВАЖЕЋИХ СТАВОВА У ПОДРУЧЈУ ИСТРАЖИВАЊА	24
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ И МОДЕЛИРАЊЕ АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА ПОД ДЕЈСТВОМ СТАТИЧКОГ ОПТЕРЕЋЕЊА	30
4.1 ФАСАДНИ СПОЈ ТРАПЕЗНОГ ПРОФИЛИСАНОГ ЛИМА ЗА НОСЕЋУ КОНСТРУКЦИЈУ	31
4.2 Смичући СПОЈ	33



4.3 МАТЕРИЈАЛ.....	35
4.3.1 ПОЦИНКОВАНИ ЛИМ	35
4.3.2 АДХЕЗИВИ	36
4.4 УТИЦАЈ ПОСТУПКА ОБРАДЕ НА КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОВРШИНЕ АДХЕРЕНАТА	37
4.4.1 ХРАПАВОСТ ПОВРШИНЕ АДХЕРЕНАТА	37
4.5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ОБРАДЕ ПОВРШИНА НА ЧВРСТОЋУ ФАСАДНОГ СПОЈА И МЕХАНИЗАМ ЛОМА	40
4.5.1 ГЕОМЕТРИЈА СПОЈА	41
4.5.2 ИЗРАДА СПОЈА.....	43
4.5.2 ИСПИТИВАЊЕ УЗОРАКА ФАСАДНИХ СПОЈЕВА	44
4.6 ИСПИТИВАЊЕ ДВОСТРУКИХ ПРЕКЛОПНИХ СПОЈЕВА ОПТЕРЕЂЕНИХ НА СМИЦАЊЕ..	48
4.7 ИСПИТИВАЊЕ ЧЕОНИХ СПОЈЕВА ОПТЕРЕЂЕНИХ НА ЗАТЕЗАЊЕ.....	51
4.8 ИСПИТИВАЊЕ И ОДРЕЂИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА ПОЦИНКОВАНОГ ЛИМА...53	53
4.9 ОДРЕЂИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА АДХЕЗИВА	55
4.9 НУМЕРИЧКИ ПОСТУПАК МОДЕЛИРАЊА АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА ПРИМЕНОМ МКЕ... 60	60
5 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ АНАЛИЗЕ АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА ПОД ДЕЈСТВОМ ЦИКЛИЧНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА.....	68
5.1 ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ ЗАМОРА	68
5.2 АНАЛИЗА ЗАМОРА ПРИ ДЕЈСТВУ ОПТЕРЕЂЕЊА КОНСТАНТНЕ АМПЛИТУДЕ.....	70
5.2.1 S-N (СИЛА-ВЕК) ПРИСТУП.....	71
5.2.2 S-N МОДЕЛИ ЗА ПРОЦЕНУ ВЕКА ТРАЈАЊА.....	72
5.2.3 МЕТОДЕ ОДРЕЂИВАЊА ПАРАМЕТАРА S-N МОДЕЛА.....	75
5.2.4 РАЗВОЈ АЛГОРИТАМА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА S-N МОДЕЛА.....	79
5.2.5 ДИЈАГРАМИ КОНСТАНТНОГ ВЕКА ТРАЈАЊА	84
5.2.6 E-N (ДЕФОРМАЦИЈА-ВЕК) ПРИСТУП	86
5.2.7 МЕХАНИКА ОШТЕЂЕЊА	89
5.2.8 ПРИНЦИП ПРЕОСТАЛЕ ЧВРСТОЋЕ	93
5.2.9 ПРЕДЛОГ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА НОРМАЛИЗОВАНЕ РЕЗЕРВЕ ЧВРСТОЋЕ.....	98
5.2.10 ПРЕДЛОГ МЕТОДЕ ПРЕДВИЂАЊА ВЕКА ТРАЈАЊА НЕРАЗАРАЈУЋИМ ПОСТУПКОМ ИСПИТИВАЊА	103
5.3 АНАЛИЗА ЗАМОРА ПРИ ДЕЈСТВУ ОПТЕРЕЂЕЊА ПРОМЕНЉИВЕ АМПЛИТУДЕ	110
5.3.1 ПРИНЦИП КУМУЛАТИВНОГ ОШТЕЂЕЊА	110
5.3.2 ПРЕОСТАЛА ЧВРСТОЋА ПРИ ДЕЈСТВУ ОПТЕРЕЂЕЊА ПРОМЕНЉИВЕ АМПЛИТУДЕ.....	114
5.3.3 УТИЦАЈ УЧЕСТАЛОСТИ ПРОМЕНЕ НИВОА ОПТЕРЕЂЕЊА НА ВЕК ТРАЈАЊА – „CYCLE MIX“ ЕФЕКАТ.....	116
5.3.4 ПРЕДЛОГ МЕТОДЕ ЗА ПРЕДВИЂАЊЕ ВЕКА ТРАЈАЊА ПОД ПРОМЕНЉИВИМ ЦИКЛИЧНИМ ОПТЕРЕЂЕЊЕМ ПРИМЕНОМ МОДЕЛА НРЧ.....	118
6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ И МОДЕЛОВАЊЕ АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА ПОД ДЕЈСТВОМ ЦИКЛИЧНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА	122



6.1 Испитивање фасадних спојева	122
6.1.1 Испитивање излагањем цикличном оптерећењем до лома	122
6.1.2 Преостала чврстоћа	134
6.2 Испитивање двоструких преклопних спојева	135
6.2.1 Испитивање излагањем цикличном оптерећењу до лома	136
6.2.2 Преостала чврстоћа	141
6.3 Валидација модела НРЧ и предложене методе предвиђања века трајања	143
6.3.1 Модел нормализоване резерве чврстоће	146
6.3.2 Поступак одређивања века трајања при дејству променљивог цикличног оптерећења применом модела НРЧ	148
6.3 Валидација методе предвиђања века трајања неразарајућим поступком испитивања	151
7 Завршне напомене и закључци	155
7.1 Закључци	155
7.2 Правци даљих истраживања	160
8 Литература	161
9 Биографија аутора	172



СПИСАК СЛИКА:

Слика 2.1 Типови адхезионих спојева	13
Слика 2.2 Поређење конфигурација адхезионих спојева	14
Слика 2.3 Силе у адхезионом споју	14
Слика 2.4 Механизми лома адхезионих спојева	15
Слика 2.5 Поступци припреме површина за адхезионо спајање	16
Слика 2.6 Утицај одмашћивања на квашење адхерената.....	17
Слика 2.7 Уређаји за мешање и наношење адхезива.....	19
Слика 2.8 Примена адхезионих спојева код спајања делова авиона	21
Слика 2.9 Адхезионо спојене компоненте аутомобила Aston Martin Vanquish.....	21
Слика 2.10 Монтажни наставак изведен применом адхезионог спајања	23
Слика 2.11 Ојачавање кутијастог профила структуралне фасаде	23
Слика 3.1 Преглед утицаја на носивост адхезионих спојева.....	24
Слика 3.2 Утицај обликовања адхерената на концентрацију напона у адхезионом споју	25
Слика 4.1 Недостаци употребе механичких спојних средстава код спајања трапезастих лимова фасадне конструкције.....	32
Слика 4.2 Структурална фасадна конструкција – примена адхезионих спојева	32
Слика 4.3 Расподела нормалних напона у деформисаном једноструком преклопном споју	33
Слика 4.4 Расподела нормалних напона код двоструких преклопних спојев	34
Слика 4.5 Увећане слике и 3D модели површина.....	38
Слика 4.6 Параметри површинске текстуре.....	39
Слика 4.7 Вредности параметара површинске текстуре за након обрада површина поступцима наведеним у табели 4.2.	40
Слика 4.8 Геометрија испитаних узорак.....	42
Слика 4.9 Димензије трапезастог лима.....	42
Слика 4.10 Димензије прикључног Т-профила.....	42
Слика 4.11 Наношење адхезива.....	43
Слика 4.12 Фиксирање споја теретом	43
Слика 4.13 Уређаји за кондиционирање и испитивање затезањем: а) клима-комора б) универзална серво-хидраулична кидалица.....	44
Слика 4.14 Диспозиција при испитивању фасадног споја под дејством статичког оптерећења.....	45
Слика 4.15 Дијаграм сила-померање – Lord 410 GB – ПП1	45
Слика 4.16 Дијаграм сила-померање – Lord 410 GB – ПП2	46



Слика 4.17 Дијаграм сила-померање – Sika Power -477 – ПП1	46
Слика 4.18 Дијаграм сила-померање – Sika Power -477 – ПП2	46
Слика 4.19 Дијаграм сила-померање – Körapur 482 – ПП2	46
Слика 4.20 Механизми лома испитаних узорака фасадних спојева	47
Слика 4.21 Геометрија испитаног двоструког преклопног споја.....	49
Слика 4.22 Обезбеђење геометрије слоја адхезива	49
Слика 4.23 Припрема двоструких преклопних спојева	49
Слика 4.24 Диспозиција при испитивању двоструког преклопног споја поф дејством статичког оптерећења.....	50
Слика 4.25 Дијаграм сила-померање – двоструки преклопни спој – Lord 410/GB	50
Слика 4.26 Геометрија чеоног споја	51
Слика 4.27 Уређај за монтирање адхезионих чеоних спојева	52
Слика 4.28 Диспозиција при испитивању узорка чеоног споја.....	52
Слика 4.29 Дијаграм сила-померање – чеони спој – Lord 410/GB	52
Слика 4.30 Геометрија узорка од поцинкованог лима.	53
Слика 4.31 Диспозиција при испитивању епрувете поцинкованог лима.....	54
Слика 4.32 Дијаграм напон-дилатација челика	55
Слика 4.33 Зависност резултата нумеричког прорачуна од типа анализе	55
Слика 4.34 Осредњена τ - γ крива, двоструки преклопни спој, Lord 410/GB	57
Слика 4.35 Осредњена σ - ϵ крива, чеони спој, Lord 410/GB	57
Слика 4.36 Корекција деформације адхезива.....	59
Слика 4.37 Дијаграм напон-дилатација, Lord 410/GB.....	59
Слика 4.38 Зависност пластичне дилатације и напона	59
Слика 4.39 Модел двоструког преклопног споја у ABAQUS-у	61
Слика 4.40 Спрезање чворова ивице адхерента.....	62
Слика 4.41 Упоређење нумеричког са експерименталним дијаграмима сила-померање	63
Слика 4.42 Приказ фон Мизесових напона при максималној деформацији.....	63
Слика 4.43 Модел фасадног споја у ABAQUS-у	65
Слика 4.44 Поређење дијаграма сила-померање добијених нумеричким и експерименталним путем	66
Слика 4.45 Приказ фон Мизесових напона при максималној деформацији.....	66
Слика 5.1 – Подручје нискоциличног и високоциличног замора	69
Слика 5.2 Константно циклично оптерећење	70
Слика 5.3 S-N крива.....	72



Слика 5.4 Хибридни S-N модел.....	74
Слика 5.5 Сендецијкев S-N модел.....	75
Слика 5.6 Принцип метода најмањих квадрата	77
Слика 5.7 Типична S-N крива.....	80
Слика 5.8 Упрошћени алгоритам програма за одређивање параметара S-N криве методом максималне веродостојности, написаног у MATLAB-у.....	81
Слика 5.9 Упрошћени алгоритам програма за одређивање параметара S-N криве методом Сендецкија, написаног у Matlab-у	83
Слика 5.10 Хајгов дијаграм, Герберова и Гудманова крива.....	85
Слика 5.11 ϵ -N дијаграм према Кофин-Менсоновој једначини	88
Слика 5.12 Оптерећење контролисаном деформацијом	92
Слика 5.13 Мерење параметра оштећења контролисаном деформацијом.....	92
Слика 5.14 Промена нагиба хистерезисне петље са порастом броја циклуса	93
Слика 5.15 Крива преостале чврстоће	95
Слика 5.16 – Преостала чврстоћа - утицај параметра α	96
Слика 5.17 Нормализовани дијаграм преостале чврстоће	98
Слика 5.18 Дијаграм преостале чврстоће (3 произвољна нивоа оптерећења).....	99
Слика 5.19 Нормализована преостала чврстоћа (3 произвољна нивоа оптерећења)	99
Слика 5.20 Принцип резерве чврстоће	100
Слика 5.21 Крива нормализоване резерве чврстоће.....	101
Слика 5.22 Утицај параметара α и β на облик дијаграма нормализоване резерве чврстоће	102
Слика 5.23 Експериментални резултати деградације крутости из [128].....	106
Слика 5.24 Поређење експерименталних кривих деградације крутости из [128].....	107
Слика 5.25 Одређивање параметара модела фитовањем криве према експерименталним подацима.....	108
Слика 5.26 Итеративни поступак одређивања века трајања.....	109
Слика 5.27 Модели кумулативног оштећења.....	111
Слика 5.28 Кумулативно оштећење при дејству променљивог цикличног оптерећења	112
Слика 5.29 Принцип преостале чврстоће за променљиво циклично оптерећење	115
Слика 5.30 Примена <i>cusle mix</i> фактора	117
Слика 5.31 Примена принципа нормализоване резерве чврстоће у случају променљивог цикличног оптерећења	121
Слика 6.1 Универзална серво-хидраулична кидалица MTS 810.....	123



Слика 6.2 Диспозиција при испитивању фасадног споја под дејством цикличног оптерећења.....	123
Слика 6.3 Систем за аквизицију података HBM MGCplus	123
Слика 6.4 Поређење S-N кривих фасадних спојева – Lord 410GB	126
Слика 6.5 Поређење S-N кривих фасадних спојева – Kögarig 842	126
Слика 6.6 Поређење нормализованих S-N кривих фасадних спојева.....	127
Слика 6.7 Предвиђање века трајања фасадних спојева са интервалом поверења од 90% - Lord 410GB.....	128
Слика 6.8 Предвиђање века трајања фасадних спојева са интервалом поверења од 90% - Kögarig 842.....	128
Слика 6.9 Излазни сигнал интензитета силе	129
Слика 6.10 Пример деформацијског одговора узорка под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде	130
Слика 6.11 Пример поједностављења података у оквиру једног сегмента:.....	131
Слика 6.12 Параметри деформацијског одговора.....	131
Слика 6.13 Пример дијаграма промене крутости и расипане енергије по циклусу оптерећења.....	132
Слика 6.14 Дијаграм промене крутости порастом броја циклуса - Lord 410GB	132
Слика 6.15 Дијаграм промене расипане енергије по циклусу са порастом броја циклуса - Lord 410GB.....	133
Слика 6.16 Дијаграм промене крутости порастом броја циклуса - Kögarig 842	133
Слика 6.17 Дијаграм промене расипане енергије по циклусу са порастом броја циклуса - Kögarig 842.....	134
Слика 6.18 Нормализована резерва чврстоће - фасадни спој - Lord 410GB	135
Слика 6.19 Диспозиција при испитивању двоструког преклопног споја под дејством цикличног оптерећења	137
Слика 6.20 Поређење S-N кривих двоструких преклопних спојева – Lord 410GB.....	138
Слика 6.21 Предвиђање века трајања двоструких преклопних спојева са интервалом поверења од 90% - Lord 410GB	138
Слика 6.22 Пример деформацијског одговора двоструког преклопног споја под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде	139
Слика 6.23 Дијаграм промене крутости порастом броја циклуса – Lord 410GB.....	140
Слика 6.24 Дијаграм промене расипане енергије по циклусу са порастом броја циклуса – Lord 410GB	140
Слика 6.25 Дијаграм сила-померање узорка испитаних са брзином деформације од 70mm/min.....	142
Слика 6.26 Нормализована преостала чврстоћа двоструких преклопних спојева	143
Слика 6.27 Геометрија споја [90]	144



Слика 6.28 S-N крива једноструких преклопних спојева, према [90]	144
Слика 6.29 Преостала чврстоћа једноструких преклопних спојева, према [90].....	145
Слика 6.30 Век трајања спојева при променљивом цикличном оптерећењу, према [90]:	146
Слика 6.31 Поређење кривих НРЧ са експерименталним подацима.....	146
Слика 6.32 Криве преостале чврстоће	147
Слика 6.33 Псеудо-алгоритам програма за одређивање века трајања при дејству променљивог цикличног оптерећења	148
Слика 6.34 Поређење предвиђања века трајања и експ. података – спектар А	149
Слика 6.35 Поређење предвиђања века трајања и експ. података – спектар В	150
Слика 6.36 Пример тока преостале чврстоће при дејству променљивог цикличног оптерећења.....	151
Слика 6.37 Одређивање параметара модела промене крутости.....	152
Слика 6.38 Предвиђање века трајања за различите сегменте века трајања	153



СПИСАК ТАБЕЛА:

Табела 2.1 Поређење карактеристика различитих метода спајања.....	11
Табела 4.1 Карактеристике адхезива коришћених у експерименталном истраживању .	37
Табела 4.2 Типови обраде површина	39
Табела 4.3 Поступци припреме површина за спајање.....	41
Табела 4.4 Серије испитаних узорака	45
Табела 4.5 Средње вредности чврстоћа и механизми лома испитаних узорака фасадних спојева	47
Табела 4.6 Механичка својства адхезива Lord 410/GB	58
Табела 4.7 Параметри материјала - челик	61
Табела 4.8 Параметри материјала - адхезив.....	61
Табела 5.1 Основни појмови константног цикличног оптерећења.....	70
Табела 6.1 Испитивање века трајања узорака фасадног споја – Lord 410GB	124
Табела 6.2 Испитивање века трајања узорака фасадног споја – Körapur 842	124
Табела 6.3 Параметри S-N кривих – фасадни спојеви	125
Табела 6.4 Преостала чврстоћа узорака фасадног споја – Lord 410GB.....	135
Табела 6.5 Испитивање века трајања узорака преклопног споја – Lord 410GB	137
Табела 6.6 Параметри S-N кривих – двоструки преклопни спојеви.....	137
Табела 6.7 Резултати испитивања преостале чврстоће двоструких преклопних спојева	142
Табела 6.8 Комбинације нивоа оптерећења различитих спектра.....	145
Табела 6.9 R ² вредности кривих НРЧ.....	147
Табела 6.10 Резултати предвиђања века трајања	152



1 УВОД

1.1 Предмет и проблем истраживања

Адхезиви се користе дуже од 60 година као средства за спајање конструкцијских елемената. Они су нашли широку примену у различитим индустријама, а нарочито у ауто и авио индустрији. Последњих година у све већој мери представљају алтернативу традиционалним методама спајања у грађевинарству. Разлог за то су бројне предности које овај тип спајања пружа, као што су: могућност формирања лаких, али довољно чврстих конструкција; могућност спајања разнородних материјала као што су различити метали (укључујући и алуминијум и поцинковани лим за које је познато да се веома тешко заварују), бетон, пластика и композити; могућност спајања танких лимова; различите естетске погодности (избегавање видљивих завртњева код фасадних конструкција, смањење појаве корозије око рупа завртњева и сл.). Адхезионо спајање може представљати веома добру алтернативу класичним методама спајања у металним конструкцијама, јер се њиме могу избећи већи проблеми, као што су заостали (резидуални) напони код заваривања и редукција попречног пресека елемената код спајања завртњевима. Поред тога, металне конструкције, због високог степена радионичке обраде, могу представљати просперитетно поље примене адхезионог спајања. У радионичким условима се могу изградити адхезиони спојеви високе чврстоће и трајности.

Применљивост адхезионог спајања потврђена је различитим примерима из праксе, као и мноштвом спроведених истраживања. Дobar пример из праксе који показује применљивост и трајност адхезионих спојева код металних конструкција је пешачки мост преко канала Lippe у граду Марл (Немачка), распона 56m, изграђен 1956. године. Адхезив је коришћен за спајање елемената решетке за чворне лимове. Ради лакшег монтирања и за случај отказа адхезионих спојева, додатно су коришћени завртњеви. Мост се и данас несметано користи, без већих интервенција на њему.



Шира употреба адхезионих спојева ограничена је чињеницом да за њихов прорачун и димензионисање још увек нису развијени одговарајући стандарди. Уместо тога, скупа и дуготрајна (time consuming) испитивања су неопходна за потврђивање њихове носивости и трајности ради поуздане употребе у појединачним случајевима. Овакав приступ је економски исплатив једино у случају серијске производње, што није својствено грађевинској индустрији. Један од ретких стандарда у коме су дати основни принципи и захтеви прорачуна адхезионих спојева као заптивних система је ЕТАГ (European technical approval for structural sealant glazing systems) [1]. Међутим, са становишта актуелног концепта прорачуна ЕВРОКОД-а [2], заснованом на концепту граничних стања, ЕТАГ се може окарактерисати као застарео [3]. Концепт граничног стања носивости је заснован на коришћењу принципа парцијалних коефицијената сигурности. У најновијим истраживањима у области адхезионог спајања чине се напори да се на прорачун ових спојева примени принцип парцијалних коефицијената сигурности [3–5]. За то је неопходно истражити стохастичку природу понашања адхезионих спојева, као и експлоатационе факторе који временом могу довести до промене карактеристика спојева.

Процес стандардизације условљава спровођење опсежних експерименталних испитивања дуготрајног понашања адхезионих спојева са акцентом на различите геометрије и типове спојева (смичући, затезни, сложени), различите типове оптерећења (статичко, ударно, циклично) као и утицаје окружења (влага и температура). До сада развијене експерименталне методе су углавном прилагођене типовима адхезионих спојева који се примењују у ауто и авио индустрији. Они подразумевају дебљине слојева адхезива које су најчешће мање од 0,5mm. Имајући у виду геометријске имперфекције и толеранције у грађевинарству, јасно је да ове димензије нису практично применљиве. Са друге стране развијене методе испитивања често подразумевају посебне поступке обраде површина адхерената (елемената који се спајају), које нису изводљиве на градилишту, али ни у радионичким условима.

Дуготрајно понашање адхезионих спојева металних адхерената је у доступним истраживањима углавном усмерено на деградацију њихових својстава услед негативног утицаја влаге, повишених температура, као и дуготрајног статичког оптерећења. Мали број истраживања је спроведено у области утицаја цикличног оптерећења на њихово понашање у току експлоатационог века. Развијене теорије



углавном подразумевају компликоване методе прорачуна, исплативе искључиво у случајевима серијске производње.

Због напред наведеног, у оквиру ове дисертације спроведено је испитивање утицаја статичког и цикличног оптерећења на два карактеристична типа адхезионих спојева лаких металних конструкција, ради формулисања модела и метода којима је могуће описати и предвидети њихово понашање. При изради спојева су коришћени материјали и поступци обраде површина адхерената који су карактеристични за примену у грађевинским конструкцијама.

1.2 Циљ истраживања

Основни циљ докторске дисертације је да се применом савремених експерименталних и нумеричких метода истражи и опише понашање адхезионих спојева при дејству статичког и цикличног оптерећења. Ради добијања поузданих резултата, најпре је неопходно одабрати поступак обраде површина адхерената, који ће приликом испитивања обезбедити кохезиони лом споја. На основу експерименталних резултата формулисаће се модели и поступци за описивање и предвиђање њиховог понашања у условима карактеристичним за примену у грађевинским конструкцијама.

Да би то било могуће остварити, дефинисани су појединачни циљеви истраживања:

- Испитивање механичких својстава материјала коришћених за израду спојева.
- Испитивање затезне чврстоће и чврстоће на смицање затезањем адхезионих спојева.
- Испитивање понашања спојева при статичком оптерећењу за различите поступке припреме површина пре спајања.
- Испитивање века трајања споја (броја циклуса до лома) под дејством синусног цикличног оптерећења константне амплитуде и степена асиметрије циклуса.
- Испитивање промене чврстоће спојева након парцијалног замора (броја циклуса мањег од века трајања).
- Испитивање могућности поузданог одређивања параметара материјала неопходних за нумерички прорачун применом методе коначних елемената, којима се описује пост-еластична област напрезања; применом резултата

испитивања адхезионих спојева одређене дебљине адхезива и типа обраде адхерената који се могу применити у грађевинској индустрији.

- Развој математичког модела и методе за описивање понашања адхезионих спојева при дејству цикличног оптерећења и предвиђање века трајања.

Постављени циљеви истраживања које је спроведено у оквиру рада на овој докторској дисертацији засновани су на основном полазишту да је могуће формулисати модел за описивање понашања адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења користећи реалне податке о својствима материјала. Коришћењем сопствених и експерименталних података из доступне литературе биће спроведена верификација/валидација развијених модела.

1.3 Примењена методологија

Приликом истраживања понашања адхезионих спојева под дејством статичког и цикличног оптерећења коришћене су експерименталне, нумеричке и аналитичке методе.

Експерименталне методе су коришћене при испитивању различитих врста спојева под дејством статичког и цикличног оптерећења, као и материјала од којих су израђени адхеренти.

Нумеричке методе су коришћене у следећим сегментима истраживања:

- Осредњавање кривих добијених експерименталним путем ради одређивања механичких својстава материјала.
- Нумерички прорачун напонско-деформацијског стања адхезионих спојева под дејством статичког оптерећења.
- Одређивање параметара емпиријских модела на основу којих се описује понашање адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде (S-N криве, модел нормализоване резерве чврстоће, модел деградације крутости).
- Предвиђање века трајања спојева под дејством цикличног оптерећења променљиве амплитуде.

- Прорачун крутости и дисипиране енергије по циклусу оптерећења, на основу експерименталних података који се односе на деформацијски одговор адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења након различитих сегмената века трајања.
- Предвиђање века трајања спојева под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде применом модела деградације крутости.

Аналитичке методе су коришћене при интерпретацији добијених резултата експерименталног истраживања, као и резултата нумеричких прорачуна адхезионих спојева.

1.4 Структура рада

Докторска теза је структурирана у 7 главних делова.

У првом поглављу је укратко приказан предмет и проблем истраживања. Представљени су основни и посебни циљеви истраживања и примењена методологија. На крају поглавља је дат кратак приказ садржаја тезе.

У другом поглављу су приказане основе начина извођења и анализе адхезионог спајања. Дат је кратак опис историјског развоја адхезива, врста адхезива који се примењују у конструкцијама и критеријума за њихов избор. Наглашене су предности и недостаци примене адхезионог спајања и приказано поређење са традиционалним методама спајања у металним конструкцијама. Сажето је приказан општи поступак израде адхезионих спојева. На крају поглавља су приказана различита поља примене адхезионог спајања са посебним нагласком на грађевинску индустрију.

У трећем поглављу је приказан преглед литературе и важећих ставова у области адхезионог спајања. Сумирани су фактори који утичу на носивост спојева, који се односе на процес израде, геометрију елемената који се спајају, као и геометрију самог адхезива у споју. Приказан је преглед литературе у области моделовања адхезионих спојева под дејством статичког оптерећења. Преглед литературе у области моделовања адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења је приказан посебно, у оквиру 5. поглавља.

У четвртном поглављу су приказани и анализирани резултати експерименталног испитивања и нумеричког прорачуна адхезионих спојева под дејством статичког



оптерећења, погодних за примену у лаким металним конструкцијама. Експериментално је истражен утицај различитих поступака обраде површина адхерената на механизам лома и носивост фасадног споја трапезастог лима, на основу чега је изабран поступак обраде коришћен у даљем току истраживања. Поред тога, поређењем нумеричких и експерименталних резултата, оцењена је поузданост одређивања механичких својстава адхезива применом резултата испитивања чеоних и двоструких преклопних спојева, што не спада у стандардне поступке одређивања параметара материјала.

У петом поглављу су приказане основе теорије замора, примењене на адхезионе спојеве под дејством цикличног оптерећења. Развијени су оригинални алгоритми (дијаграми тока) за одређивање параметара S-N кривих применом различитих метода, описаних у доступној литератури. У оквиру овог поглавља предложен је модел за описивање деградације чврстоће адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде и степена асиметрије циклуса. Приказан је предлог методе за предвиђање века трајања адхезионих спојева под дејством променљивог цикличног оптерећења. Такође, приказан је и предлог методе за предвиђање века трајања адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде, неразарајућим поступком испитивања.

У шестом поглављу су приказани и анализирани резултати експерименталног испитивања и моделирања адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења. Експериментално испитивање је спроведено на истим типовима спојева који су коришћени за испитивање под дејством статичког оптерећења, приказаних у поглављу 4. На основу експерименталних резултата приказаних у овом поглављу и резултата истраживања из доступне литературе, спроведена је валидација модела и метода предложених у 5. поглављу.

У седмом поглављу су дате завршне напомене и закључци, и назначени правци даљег истраживања.



2 АДХЕЗИОНО СПАЈАЊЕ

Адхезиви су материјали који имају способност спајања два или више материјала приањањем на њихову површину. Спој обезбеђују адхезионе силе између адхезива и елемента који се спајају и кохезионе силе унутар самог адхезива.

2.1 Историја адхезива и адхезионог спајања

Најстарији податак о употреби адхезива од стране човека је пронађен у пећини Nahal Netzer у Израелу. На многим откривеним артефактима су пронађени остаци колагених материјала старих више од 8000 година, за које се верује да су добијени из животињске коже [6].

Први писани извори у којима се спомињу адхезиви и њихова употреба датирају од 200 година п. н. е., када су описани једноставни поступци справљања и употребе адхезива животињског порекла [7].

Крајем XVII века долази до настанка прве фабрике за њихову производњу у Холандији (1690.год.) [8]. Након тога се отварају прве фабрике у Великој Британији и САД.

XIX век и индустријска револуција су довели до побољшања карактеристика адхезива животињског порекла синтетичким путем. У [8] је детаљно приказана хронологија њиховог развоја у САД, у периоду од почетка XVIII века до краја Другог светског рада. Велики напредак је направљен у време Другог светског рата, када су развијене прве потпуно синтетичке врсте [5]. Побољшане карактеристике ових материјала омогућиле су њихову употребу за спајање конструкцијских елемената. Са конструкцијском применом долази до све веће употребе и њиховог константног развоја. Данас се адхезиви користе у многим индустријама, међу којима је предњаче ауто и авио индустрија, где су постали незаменљиви за одређене употребе, а све већу примену налазе и у грађевинској индустрији.

2.2 Врсте адхезива

Адхезиви су данас заступљени у различитим облицима: течности, пасте, раствори, емулзије, прашкови, траке, филмови итд.. Према пореклу, најчешће се сврставају у три различите категорије:

- природне,
- неорганске,
- синтетичке.

Природни адхезиви се добијају из супстанци биљног и животињског порекла, укључујући скроб, гуму, декстрин, сојино брашно и колаген. Ова врста се обично карактерише веома ниском чврстоћом и нема конструкцијску употребу.

Неоргански адхезиви се углавном израђују на бази натријум-силиката и магнезијум-хлорида. Главна предност ових материјала је јефтина производња. Са друге стране, њихову ширу употребу, такође ограничава веома ниска чврстоћа.

Синтетички адхезиви су данас најраспрострањенији. Захваљујући значајно побољшаним механичким својствима, имају могућност широке конструкцијске употребе. Ова група укључује велики број термопластичних и терморекативних полимера. Већина истраживања у области адхезионог спајања данас се спроводи коришћењем синтетичких адхезива, што, потпомогнуто развојем хемије у области полимера, доводи до константног унапређивања њихових карактеристика и развоја нових производа.

2.3 Адхезиви који се примењују за конструкције (конструкцијски адхезиви)

Под конструкцијским адхезивима се сматрају адхезиви помоћу којих се може формирати носећи спој, односно чија својства омогућују да се сила у потпуности пренесе са једног адхеренда на други. По хемијском саставу сви конструкцијски адхезиви спадају у групу попречно повезаних или умрежених полимера [5], и сврставају се у следеће групе:

- епоксидне,
- полиуретанске,
- акрилне,
- анаеробне и
- цијаноакрилатне.



У грађевинарству су најзаступљеније три групе: акрилна, епоксидна и полиуретанска.

Акрилни конструкцијски адхезиви се најчешће производе као двокомпонентни системи, који се састоје вискозне смоле на бази мономера и активатора. Када се ове две компоненте помешају, наступа процес полимеризације. Карактеришу их могућност спајања великог броја материјала (посебно метала и пластике), водоотпорност, трајност, брзо очвршћавање, као и добра адхезија чак и при једноставнијој припреми површина адхерената. Једна од негативних страна овог типа адхезива је релативно велико скупљање у току периода очвршћавања.

Епоксиди спадају у најраспрострањеније типове адхезива. Производе се као једно и двокомпонентни. За везивање једнокомпонентних врста најчешће је неопходна повишена температура, док се у случају двокомпонентних адхезива овај процес може одвијати и на собној температури, али се може убрзати загревањем чак и до 175 °С. Време очвршћавања епоксидних адхезива је знатно дуже него у случају акрилних система. Имају веома велику чврстоћу на смицање и нешто мању отпорност на одљускавање. За њихову примену најчешће је потребна темељна припрема површина адхерената. Могу се користити за спајање великог броја материјала, док највећу употребу имају код спајања метала и FRP композита (fiber reinforced polymers).

Полиуретани се, такође, производе као једнокомпонентни и двокомпонентни. Очвршћавање се одвија услед хемијске реакције која је код једнокомпонентних последица дифузије водене паре из атмосфере, док се код двокомпонентних догађа услед мешања и реакције између двеју компонената. Њих карактеришу велика дуктилност и еластичност, као и отпорност на атмосферске утицаје. Они имају нешто мању чврстоћу у односу на епоксидне и акрилне адхезиве. Користе се за спајање различитих материјала, укључујући метале и композите.

2.4 Избор адхезива

Веома важан аспект у примени адхезионог спајања представља избор врсте адхезива за конкретну конструкцијску примену. При избору се морају имати у виду сви аспекти самог процеса спајања, као и експлоатациони услови. За њихову употребу могу бити захтевана различита својства, као што су: одговарајућа чврстоћа (затезна, смичућа итд.), отпорност на дејство различитих хемикалија, повећана способност



квашења површина које се спајају, жилавост, отпорност на атмосферске утицаје, течење и замор услед цикличног оптерећења. Такође, при избору адхезива веома је важно узети у обзир и њихову компатибилност са материјалима који се спајају. Неки производи захтевају посебну припрему површина адхерената, што може успорити и поскупети процес спајања елемената и израде саме конструкције, али и потпуно онемогућити њихову примену. Један од битних фактора који може утицати на примену адхезива је специфичност процеса очвршћавања. Неки производи захтевају загревање до одређене температуре, која по правилу треба да буде константна у одређеном временском периоду, што често није могуће обезбедити.

2.5 Предности и недостаци адхезионог спајања

При избору адхезионог спајања морају се имати у виду специфичности конкретних примера употребе. У неким случајевима оно може представљати неадекватан избор, али постоје околности када је употреба адхезионог спајања најбоља или чак једина опција. Спајање керамичких елемената, еластомера, веома танких елемената и саћастих структура је у данашње време нераздвојиво од употребе адхезива. Разлози за њихову примену могу бити различити. У одређеним случајевима конвенционалне методе спајања нису у потпуности применљиве (немогућност заваривања услед великог коефицијента термичког ширења, ниске термичке отпорности и сл.). Са друге стране, естетски захтеви и захтеви везани за функционалност крајњег производа могу ограничити употребу механичких спојних средстава. Поређење карактеристика различитих метода спајања приказано је у табели 2.1.

Као што је у претходном поглављу наглашено, правилна употреба адхезива условљава детаљно познавање свих њихових специфичности, предности и недостатака. С обзиром на разноликост њихове хемијске структуре, својства адхезива варирају од производа до производа, а самим тим и специфичности које њихова примена носи са собом.

Главне предности адхезионог спајања сумираних у [5,9,10] су:

- нема оштећења на адхерентима (бушење рупа и сл.)
- нема температурних дејства на структуру материјала адхерената,
- мало опреме потребно за формирање споја,

- адхезиви уједно служе и као заптивачи,
- побољшана отпорност на корозију (рупе код механичких спојних средстава и варови могу потпомоћи појаву корозије),
- могућност формирања лаких, али довољно носивих и крутих конструкција

Табела 2.1 Упоређење карактеристика различитих метода спајања [11]

	Заваривање	Тврдо и меко лемљење	Механичка спојна средства	Адхезионо спајање
Постојаност	Трајни спојеви.	Обично трајни (меко лемљење не мора бити трајно).	Завртњиви се могу демонтирати	Трајни спојеви
Расподела напона	Локална концентрација напона.	Добра прерасподела напона.	Концентрација напона.	Добра равномерна расподела напона по површини (осим у случају одљускавања).
Изглед	Изглед споја је обично прихватљив. Некада је потребна додатна обрада површина.	Спојеви доброг изгледа.	Дисконтинуитети на површини, некада неприхватљиви.	Углавном се не виде.
Материјали који се спајају	Углавном ограничена примена код разнородних материјала.	Одређене способности спајања разнородних материјала.	Могу се спајати различити облици и комбинације материјала	Идеално за спајање разнородних материјала.
Отпорност на високе температуре	Веома велика.	Ограничена због употребе растопљеног метала.	Велика.	Слаба.
Отпорност на замор	Неопходне посебне мере за побољшање отпорности на замор.	Релативно добра отпорност на вибрације.	Неопходне специјалне мере за обезбеђивање отпорности на замор.	Одлична отпорност на замор.
Припрема за спајање	Мања или никаква за танке елементе. Обрада ивица код дебелих елемената.	Предгревање често неопходно.	Обрада рупа. Често и урезивање навоја код завртњева.	Чишћење површина је често неопходно.
Накнадна обрада спојева	Понекада неопходна термичка обрада.	Остаци корозивних топитеља морају бити очишћени.	Обично без накнадне обраде. Повремено утезање завртњева током експл. века.	Углавном није потребно.
Опрема	Релативно скупа, масивна и често захтева напајање струјом.	Јефтин ручни алат. Скупе специјалне пећи и аутоматске јединице.	Релативно јефтина, преносива и монтира се на градилишту	Само су већи мултифункционални дозери скупи.
Потрошни материјал	жице, електроде, итд., релативно јефтино.	Одређени материјали за тврдо лемљење могу бити скупи. Материјал за меко лемљење јефтин.	Прилично скуп.	Конструкцијски адхезиви су релативно скупи.
Брзина	Може бити веома брзо.	Аутоматски процес прилично брз.	Припрема спојева и ручно утезање спори. Механичко утезање прилично брзо.	Зависно од типа адхезива, неколико секунди до неколико сати.
Контрола квалитета	Недеструктивне методе су применљиве код већине поступака заваривања.	Преглед споја.	Врло поуздано утезање завртњева са контролисаним обртним моментом.	Ограничена употреба недеструктивних метода.



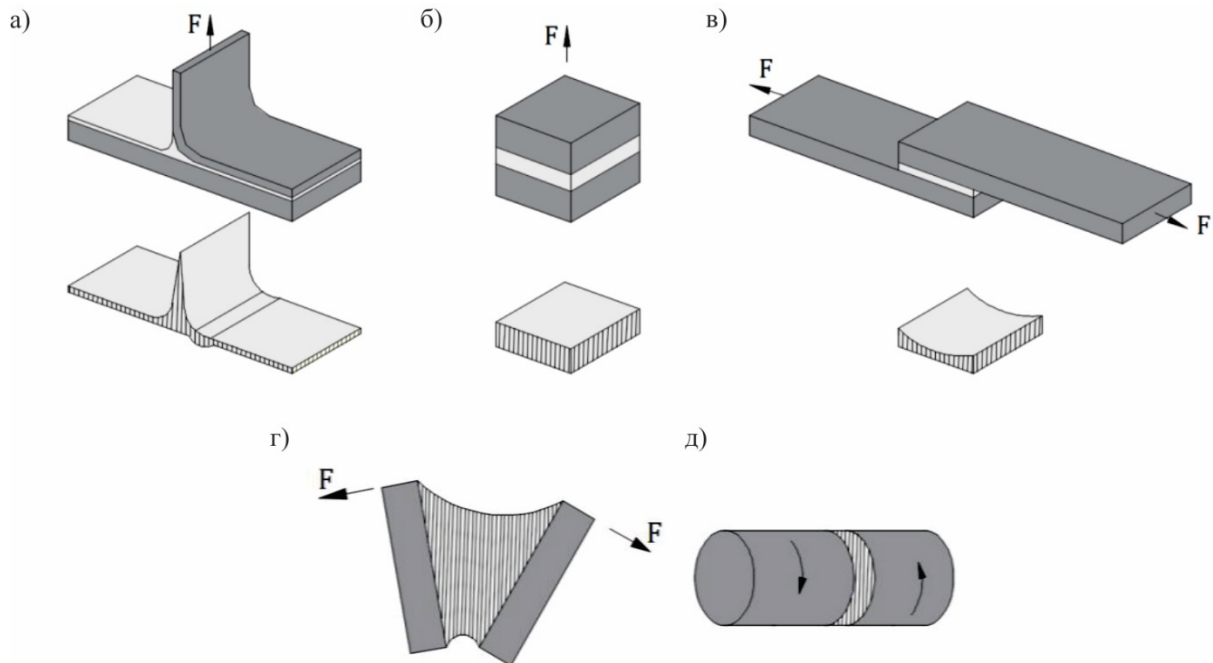
- побољшане перформансе при заморном оптерећењу (услед смањења концентрација напона)
- равномерно распоређени напони управно на правац деловања силе,
- толерантност на геометријске имперфекције елемената који се спајају,
- могућност спајања различитих материјала у истом споју (елиминација биметалне корозије),
- могућност компензовања термичких дилатација и пригушења вибрација,
- могућност примене код танких елемената,
- уз правилно планирање, релативно брза израда спојева,
- побољшана естетика спојева.

Главни недостаци који прате адхезионо спајање су:

- недостатак поузданих неструктивних метода за мониторинг адхезионих спојева,
- иако имају релативно добре механичке карактеристике, осетљиви су на одљускавање (peel) и кидање (cleavage),
- нису постојани при дејству високих температура,
- смањена отпорност на ударна оптерећења при ниским температурама,
- склони су старењу, односно деградацији механичких својстава у току експлоатације под утицајем спољашње средине,
- неопходна припрема површина адхерената,
- потребно одређено време за постизање пуне носивости (за разлику од механичких спојних средстава и заваривања), што може захтевати примену стега и оплата при изради спојева
- утицај пузања може бити значајан, поготово при повишеним температурама
- недостатак стандарда и упутстава за прорачун (стандарди се углавном односе на методе испитивања и прорачуне у ауто и авио индустрији)

2.6 Врсте спојева

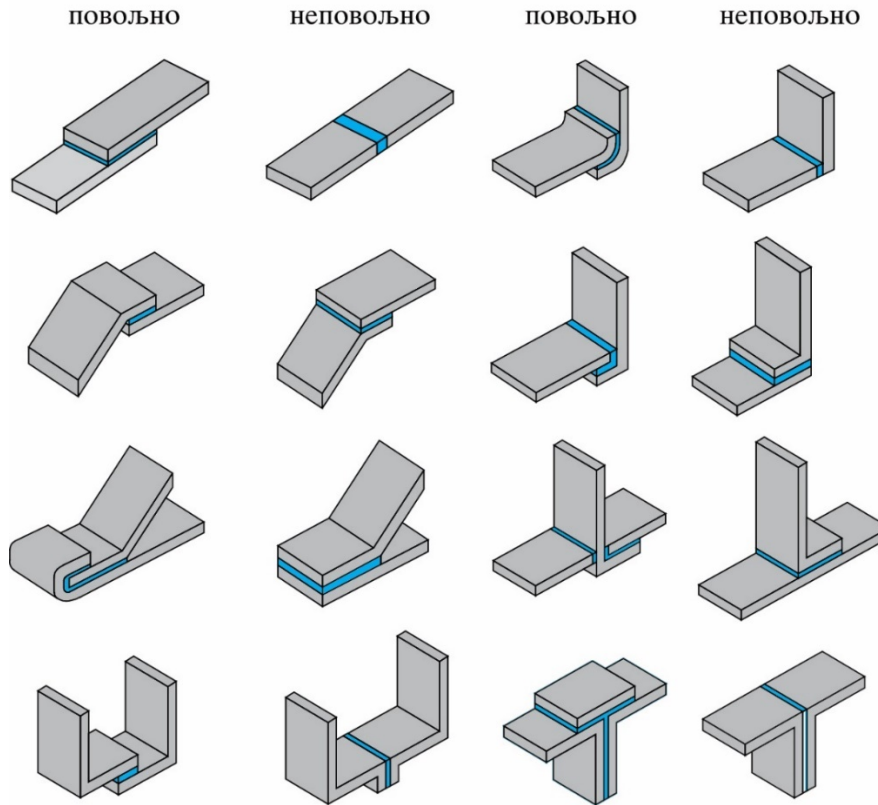
Расподела напона по површини адхезионих спојева у великој мери зависи од њихове геометрије и врсте оптерећења коме су изложени. Ови спојеви се најчешће класификују према врсти оптерећења. На слици 2.1 је приказано основних пет типова спојева.



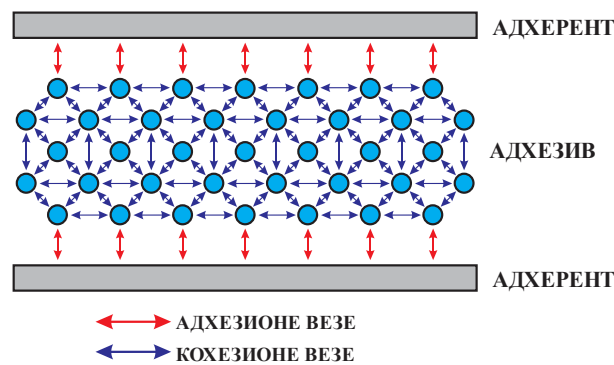
Слика 2.1 Типови адхезионих спојева, према [12]

Најнеповољнија конфигурација је приказана на слици 2.1а. Код адхезионих спојева оптерећених на одљускавање (reel) долази до концентрације нормалних напона на самој ивици слоја адхезива, испод ребра адхерента преко ког се наноси оптерећење. До сличне појаве долази и код спојева оптерећених на кидање (cleavage), што се дешава у случају спајања дебљих адхерената (слика 2.1г). Ово може довести до појаве прслине у зонама концентрације напона, што у великој мери смањује носивост и убрзава лом ових спојева. Као што се на слици 2.1б може уочити, у спојевима оптерећеним на затезање расподела напона је уједначена. Негативну страну ових спојева представља чињеница да, у случају веома чврстих адхерената, њихова чврстоћа може бити знатно мања од чврстоће основног материјала, што генерално није пожељно за било коју врсту спајања. Најповољнији случај адхезионог спајања је када је адхезив оптерећен на смицање. Оно може бити последица силе затезања или притиска у преклопним спојевима (слика 2.1в), али и торзије (слика 2.1д). С обзиром да понашање адхезионих спојева у великој мери зависи од врсте напрезања, пожељно је обликовати

их тако да се у што већој мери сведу на повољније случајеве напрезања. На слици 2.2 су приказане препоруке за обликовање адхезионих спојева, сумиране у [13].



Слика 2.2 Поређење конфигурација адхезионих спојева, према [13]



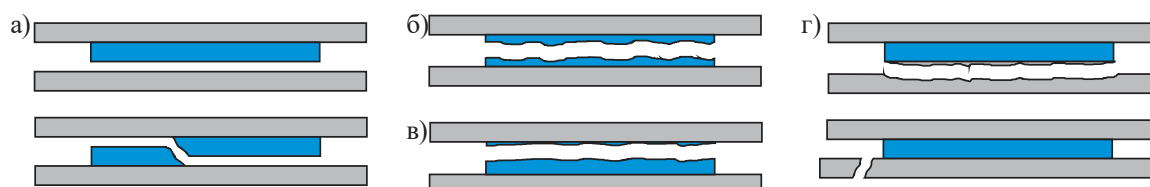
Слика 2.3 Везе у адхезионом споју

2.7 Механизми лома адхезионих спојева

Адхезиви, као што је већ напоменуто, обезбеђују везу између два елемента помоћу адхезионих сила на површини контакта са адхерентом и кохезионих сила унутар самог адхезива (слика 2.3). Добра адхезија, која није нужно последица

искључиво квалитета адхезива, је предуслов примене ових спојева. Уколико је адхезија недовољна, механичка својства адхезива неће бити у потпуности искоришћена.

У пракси се, према локацији, разликују три основна механизма лома адхезионих спојева. Остали случајеви представљају њихову комбинацију. На слика 2.4 су приказани основни механизми лома адхезионих спојева [14].



а) адхезивни лом б) кохезивни лом в) специјални кохезивни лом г) лом у адхеренту

Слика 2.4 Механизми лома адхезионих спојева, према [14]

Место лома споја у највећој мери зависи од јачине адхезионих и кохезионих веза. У случају недовољно јаким адхезионих веза, до лома долази на контактної површини са адхерентом (слика 2.4а). Овај случај се означава као адхезиони лом и карактерише га присуство слоја адхезива на само једном од адхерената. Добра адхезија доводи до померања места лома унутар самог адхезива, што се означава као кохезиони лом (слика 2.4а). Кохезиони лом се може карактерисати по присуству слоја адхезива на површини оба адхерента. Овај слој може бити веома мале дебљине, па чак и невидљив голим оком (специјални случај кохезионог лома - слика 2.4в). Уколико је материјал који се спаја слабијих карактеристика а кохезионе силе довољно велике, до лома може доћи и у адхеренту (слика 2.4г).

У пракси је веома важно тачно одредити механизам лома, што може олакшати процес дефинисања правог узрока проблема, мера за његово отклањање, као и превентивних мера за будућу примену истог типа споја.

2.8 Израда спојева

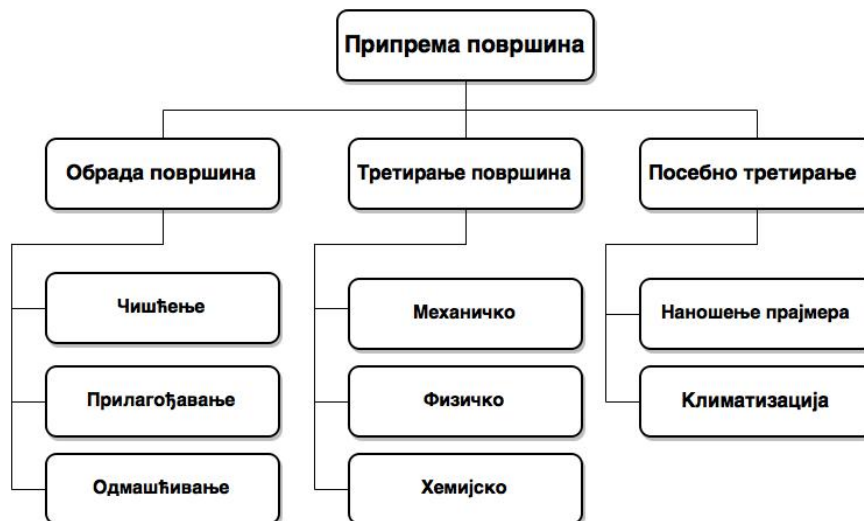
Чврстоћа адхезионих спојева зависи од њихове геометрије, типа оптерећења и карактеристика материјала и површина које се спајају. Међутим, на њу у великој мери може утицати и сам процес израде споја. Правилна израда подразумева низ корака који за циљ имају обезбеђивање довољног контакта адхезива са површинама адхерената, успостављање јаким адхезионих веза на контакту и кохезионих веза унутар адхезива

[15]. С обзиром на велики број фактора који утиче на квалитет спојева, недовољно познавање процеса адхезионог спајања може довести до варирања у њиховом квалитету, а у најгорем случају и до лома при далеко нижим оптерећењима од претпостављених. Израда споја подразумева [9]:

- припрему површина пре спајања,
- припрему и наношење адхезива,
- контролу услова приликом очвршћавања, и
- контролу квалитета израђених спојева.

2.8.1 Припрема површина

Обезбеђивање довољно чврстог и трајног споја, односно адекватне адхезије и отпорности на утицаје средине, подразумева правилну припрему површина пре наношења адхезива. Најчешћи поступци припреме површина сумирани су на слици 2.5, [9]. Под припремом се подразумева обрада и третирање површине адхерената, као и посебно третирање у случају када је неопходно додатно побољшати успостављање јаких адхезионих веза и продужити трајност спојева.

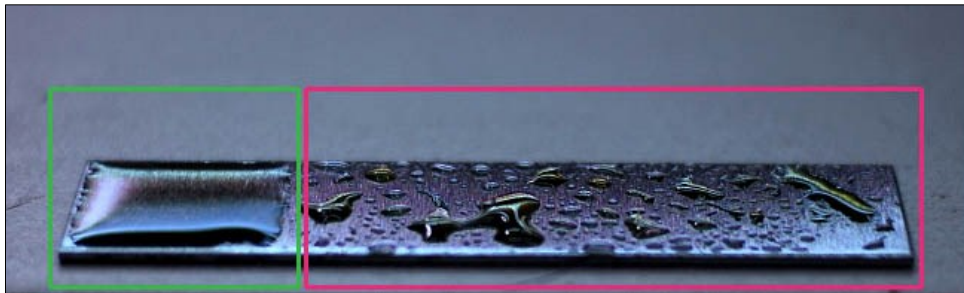


Слика 2.5 Поступци припреме површина за адхезионо спајање [13]

Чишћење површина подразумева уклањање свих нечистоћа (прљавштине, масноћа итд.), што се најчешће постиже механичким путем: брушењем, чишћењем челичном четком итд. Овом кораку потребно је посветити посебну пажњу, јер слојеви нечистоће веома лако могу проузроковати отказ спојева.

Прилагођавање површина обухвата кораке неопходне да се при спајању постигне константна дебљина слоја адхезива. Имајући у виду да су ови слојеви углавном врло мале дебљине, за постизање уједначеног слоја веома је важно да површине буду што равније и међусобно паралелне (видети препоручене дебљине слојева адхезива за примену у грађевинарству, [9]).

Одмашћивање је предуслов за постизање одговарајућег квашења адхерената (слика 2.6). У ту сврху се углавном користе различита хемијска средства или врућа дестилована вода. Постоји велики број средстава за одмашћивање, као што су различити органски растварачи (угљоводоници, кетони, алкохоли итд.). Они морају бити испарљиве супстанце које, након испаравања, не остављају траг на површини материјала.



Слика 2.6 Утицај одмашћивања на квашење адхерената [16]

Третирање површина подразумева поступке којим се побољшава остваривање јаких адхезионих сила, неопходних за формирање чврстих спојева. Брушење, четкање, шмирглање и пескарење (сачмарење) спадају у тзв. механичка третирања површина. На тај начин се може постићи одговарајућа топографија површине, и тиме постићи знатно већа чврстоћа спојева [17]. У случају пескарења неопходно је извршити накнадно одмашћивање површина, јер због природе процеса могу садржати остатке уља на себи. Поред механичког, третирање површина се може вршити физичким и хемијским путем. Ови поступци врло често могу да буду опасни по здравље, али и изузетно скупи. Због тога се примењују у специјалним случајевима. Додатне информације о посебним поступцима припреме површина, нарочито при спајању челичних и алуминијумских елемената, могу се наћи у [17–19].

Посебно третирање површина укључује употребу прајмера и климатизацију. Прајмери за адхезионо спајање се наносе у танким слојевима на претходно припремљене површине. Они су најчешће раствори полимера и органских растварача и



морају бити компатибилни са адхезивима са којима се користе. Климатизација представља остваривање одређених услова у погледу температуре и влажности ваздуха, у складу са захтевима конкретног процеса спајања (више детаља се може наћи у [13]).

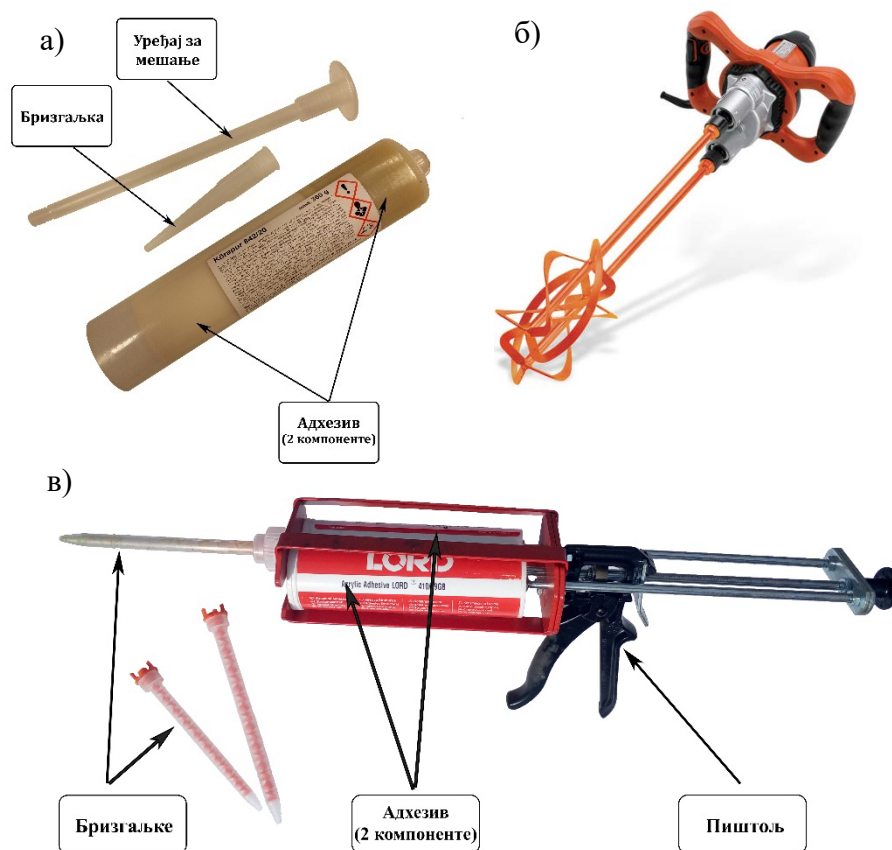
2.8.2 Припрема и наношење адхезива

Под припремом адхезива сматра се његово довођење у стање употребљивости, што подразумева дозирање компонената (конструкцијски адхезиви су у већини случајева двокомпонентни) и њихово мешање ради изазивања хемијске реакције и постизања одговарајуће вискозности. И један и други аспект су веома важни за израду квалитетног споја.

Дозирање се мора обављати строго према упутствима произвођача. Запремински удео двеју компонената је често веома различит. У неким случајевима запремина активатора једнака је свега неколико процената запремине основне компоненте. Употреба мало веће количине активатора од предвиђене може довести до знатног повећања температуре и убрзавања хемијске реакције, што скраћује време руковања адхезивом.

Мешање компонената се може вршити индустријски, ручно и помоћу динамичког или статичког миксера. Индустријско мешање адхезива подразумева серијску производњу и углавном је везано за ауто и авио индустрију (више детаља могу се наћи у [13]). Ручно мешање се врло ретко примењује, с обзиром да је на тај начин тешко обезбедити правилно дозирање и хомогену структуру адхезива, поготово при великим разликама у запремини компонената. Постоје двокомпонентни адхезиви код којих је дозирање извршено од стране произвођача, а начин паковања обезбеђује могућност ручног мешања (слика 2.7а). Негативна страна ових производа је што се, након мешања и активирања хемијске реакције, цела количина адхезива мора употребити у релативно кратком временском року. Мешање динамичким и статичким миксером се у пракси најчешће користи. Када се вискозност и запремина двеју компонената знатно разликују, за постизање хомогене мешавине неопходна је употреба динамичког миксера (слика 2.7б). При томе се мора водити рачуна о броју обртаја у минути, јер пребрзо мешање може довести до стварања мехурића ваздуха у мешавини адхезива, а касније и у самом споју. Уколико су запремине компонената и њихове вискозности приближне, мешање је могуће извести помоћу статичког миксера. Статички миксер је

бризгалька унутар које се налази испрекидана спирала, чији је сваки део окренут за 90° у односу на претходни (слика 2.7в). Адхезиви који се мешају на овај начин пакују се у кертрицима различитих запремина које се, помоћу специјалног пиштоља, истовремено истискују кроз статички миксер и на тај начин се постиже њихова хомогена структура. Предност овог начина мешања је у томе што се мешају само оне количине које се истискују. Након завршетка процеса, бризгалька се уклања, а остатак адхезива се може користити касније.



Слика 2.7 Уређаји за мешање и наношење адхезива

Код употребе адхезива, један од битних параметара представља време руковања (pot-life). Оно је по правилу препоручено од стране произвођача и представља време у коме је, након мешања компонената, адхезив употребљив. Уколико се прекорачи, адхезиви могу достићи степен полимеризације при коме је немогуће формирати спој. При вишим температурама време руковања се скраћује, тако да је у неким случајевима неопходно климатизовати просторију у којој се обавља спајање. Адхезиви се, у зависности од њихове вискозности и жељене дебљине слоја, могу нанети на више



начина: прскањем, капањем ваљањем итд. (више детаља може се наћи у [13,20]). Уколико се ради о адхезивима који се мешају статичким миксером, за наношење се углавном користи специјалан пиштољ (слика 2.7в). Након наношења слоја адхезива, адхеренти се спајају и силом притиска се истискује вишак. Уколико је истиснута маса равномерна, наношење адхезива је адекватно извршено.

2.8.3 Очвршћавање

Очвршћавање адхезива започиње хемијском реакцијом. Након наношења, већина адхезива очвршћава на собној температури. Достижање максималне чврстоће споја може трајати веома кратко, неколико десетина минута, али и неколико дана. Веома је важно у том периоду избећи оптерећивање споја. Да би се то постигло, некада је потребно извршити додатно подупирање или фиксирање споја стегама. Време очвршћавања се може скратити излагањем спојева повишеним температурама. Произвођачи адхезива у техничким листовима производа најчешће дају тачна упутства о начину скраћивања времена везивања.

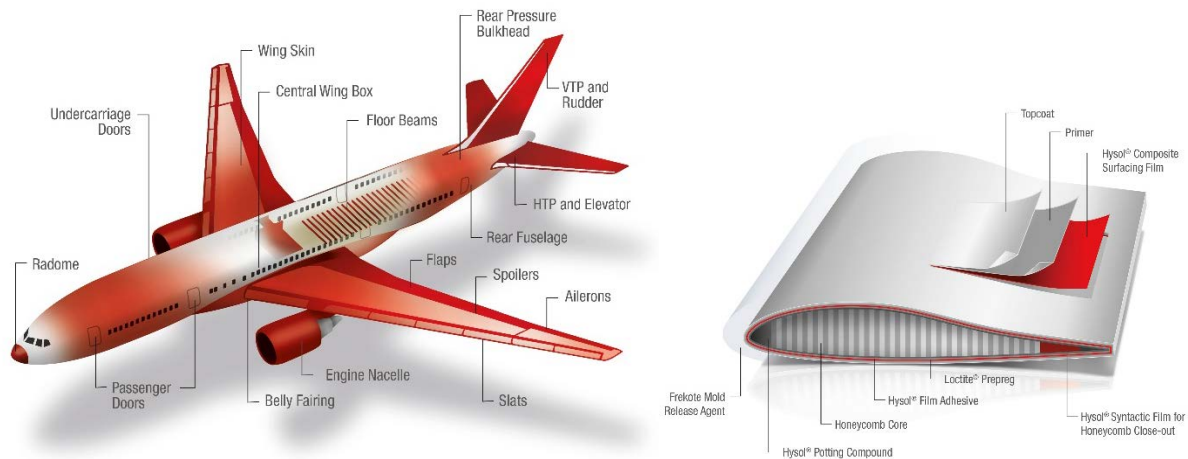
2.8.4 Контрола квалитета

Након везивања, неопходно је извршити инспекцију спојева ради откривања већих недостатака. Уколико су ивице споја видљиве, најпре се визуелно може испитати да ли су адхеренти паралелно постављени, као и да ли је адхезив равномерно распоређен по ивицама споја. Одсуство адхезива на ивици споја представља недостатак, који може довести до његовог превременог лома. Међутим, визуелна инспекција не може открити дисконтинуитете унутар самог споја. У ту сврху се користе различите недеструктивне методе испитивања, као што су ултразвучна, радиографска и термографска [21]. Ни једна од ових метода не може омогућити квантитативну процену чврстоће споја. Оне могу открити само веће шупљине у спојевима, али не и присуство контаминаната на површини адхерента. Поуздана процена чврстоће и трајности адхезионих спојева може се добити једино деструктивним испитивањем.

2.9 Примена адхезионих спојева

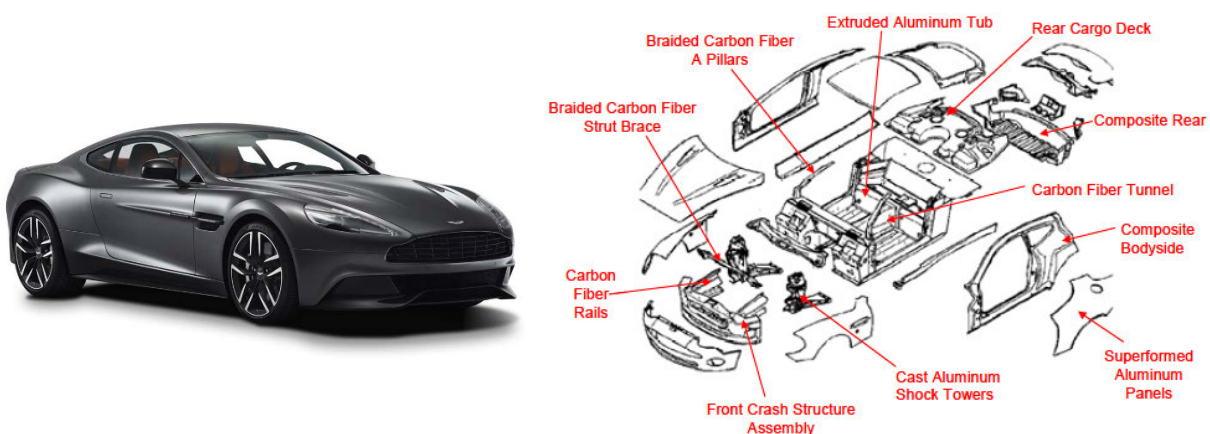
Као што је у поглављу 2.5 наглашено, адхезионо спајање пружа читав низ погодности у односу на конвенционалне методе спајања. Због тога је нашло широку примену у многим инжењерским областима.

Најдужу традицију примене адхезиви имају у авио индустрији. Данас готово сваки авион садржи делове спојене помоћу ових материјала. Њихова примена у авио индустрији се углавном односи на спајање компонента направљених од композитних материјала и алуминијума. На слици 2.8 је дат приказ различитих делова авиона за чије се спајање користе адхезиви.



Слика 2.8 Примена адхезионих спојева код спајања делова авиона [22]

Добра искуства у примени адхезива довела су до њихове шире употребе у другим индустријама. Добре заптивне способности, дуготрајност и могућност спајања веома танких лимова наметнули су ширење њихове примене на аутомобилску индустрију. Савремени аутомобили садрже по више десетина, па и стотина метара адхезионих спојева.



Слика 2.9 Адхезионо спојене компоненте аутомобила Aston Martin Vanquish [23]

Данас се адхезиви интензивно користе у производњи бродова, вагона и електро индустрији, а последњих деценија све већу примену налазе у грађевинској индустрији.

2.9.1 Примена у грађевинарству

Адхезиви се у грађевинарству најчешће користе за санацију и ојачавање постојећих и, у одређеној мери, израду нових конструкција. Примена адхезионог спајања у грађевинској индустрији детаљно је анализирана у [9 и 24].

При санацији и ојачавању постојећих конструкција адхезиви имају следеће примене:

- ојачавање дрвених елемената спајањем челичних или композитних плоча са спољашње стране,
- санацију и ојачавање бетонских конструкција инјектирањем прелина и пукотина насталих услед скупљања бетона, слегања темеља, лошег извођења, потреса и др.,
- ојачавање бетонских конструкција спајањем плоча од челика или влакнастих композита са спољашње стране затегнуте зоне конструкцијских елемената,
- ојачавање бетонских конструкција коришћењем адхезионо спојених преднапрегнутих трака од влакнастих композита.
- санацију или ојачавање зиданих конструкција утезањем помоћу карбонских платана која се адхезивима спајају за конструкцијске елементе и др.

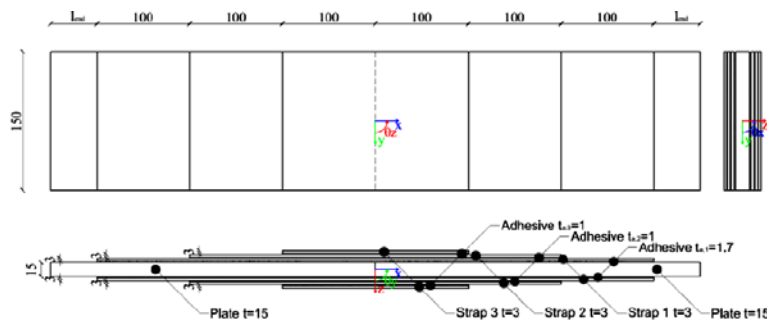
При изради нових конструкција адхезиви имају следеће примене:

- спајање префабрикованих елемената при сегментној градњи бетонских конструкција,
- замена за можданике код спрегнутих конструкција,
- заптивање конструкција,
- израда анкера у бетонским, зиданим или каменим елементима,
- израда геотехничких сидара,
- израда спојева дрвених или композитних елемената и др.

2.9.2 Примена у металним конструкцијама у грађевинарству

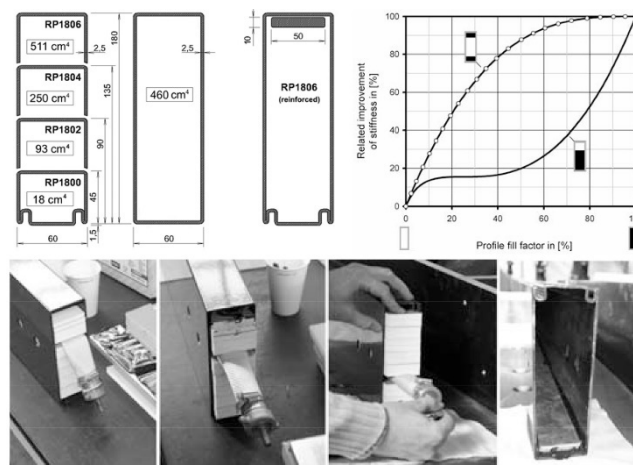
Адхезионо спајање још увек није у пуној мери афирмисано у металним конструкцијама. Међутим, различита истраживања која су спроведена у последње време показују да ова област грађевинарства пружа велике могућности за његову ширу примену. Изузетан потенцијал примене адхезионог спајања у металним конструкцијама се може илустровати следећим примерима.

У [25] је нумерички и експериментално истражена употреба адхезива за израду монтажних наставка дебелих челичних плоча. Овакви наставци захтевају преношење сила великих интензитета, што је, због појаве „shear lag“ ефекта, употребом класичних спојних средстава готово немогуће спровести. Он се може постићи употребом више слојева адхезионо спојених подвезица, при чему су прве спојене са главним плочама, а свака следећа је краћа од претходне и спојена за њену спољашњу површину (слика 2.10). Петопроцентни фрактил експериментално одређених сила лома монтажног наставка био је за 4% већи од номиналне носивости самих плоча које су настављане.



Слика 2.10 Монтажни наставак изведен применом адхезионог спајања [25]

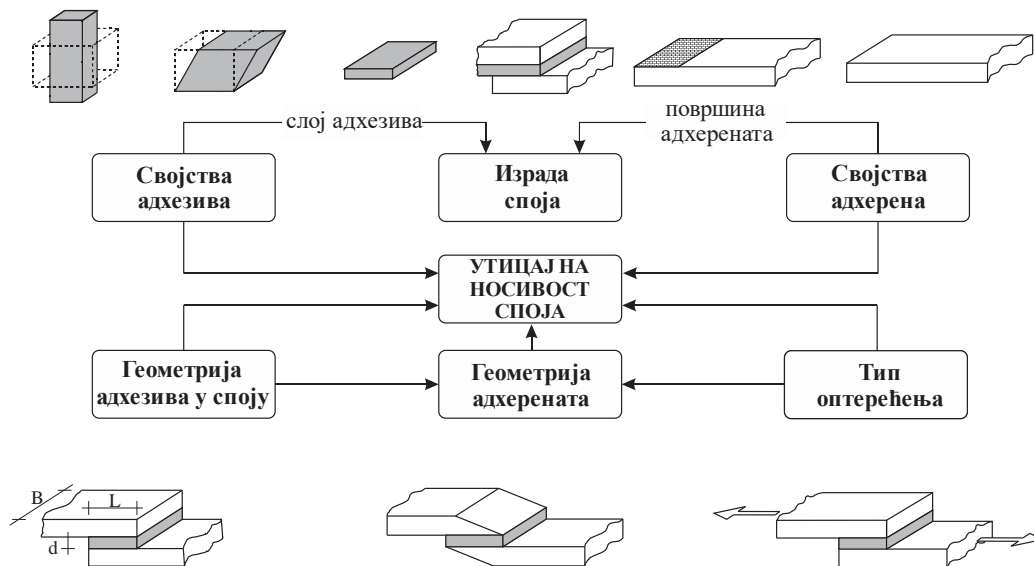
У [26] је експериментално истражена могућност ојачавања кутијастих профила структуралне фасаде помоћу челичних трака, адхезионо спојених са њихове унутрашње стране (слика 2.11). Показано је да се на овај начин постижу за 50% веће вредности носивости и крутости у односу на неојачане профиле. Закључено је да се, имајући у виду специфичност начина производње ових профила, предложено решење се намеће као најадекватније за побољшање њихових карактеристика.



Слика 2.11 Ојачавање кутијастог профила структуралне фасаде [26]

3 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ И ВАЖЕЋИХ СТАВОВА У ПОДРУЧЈУ ИСТРАЖИВАЊА

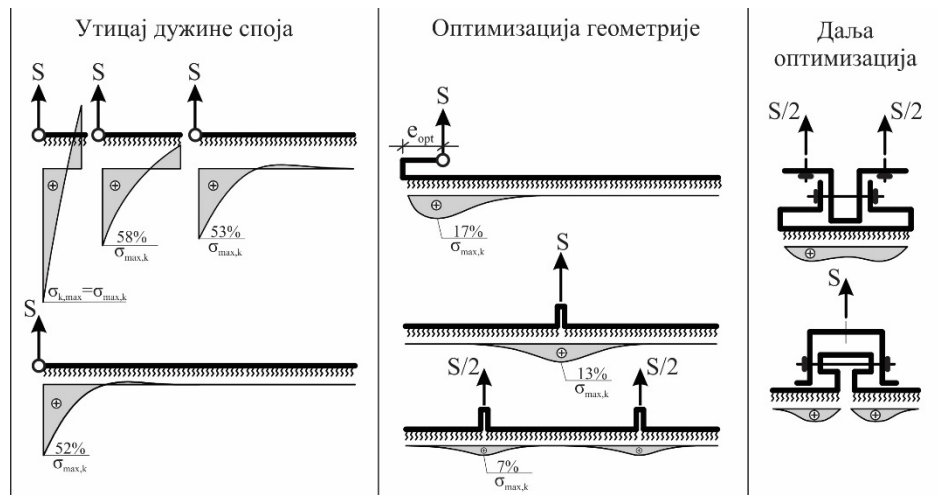
Понашање адхезионих спојева зависи од низа различитих фактора, приказаних на слици 3.1. Међу доминантним су механичка својства адхезива и адхерената, утицај параметара геометрије споја, утицаји спољашње средине, као и врста оптерећења које делује на њега.



Слика 3.1 Преглед утицаја на носивост адхезионих спојева, према [27]

Утицај геометријских параметара на њихову носивост се може разматрати са неколико различитих аспеката. Највећи утицај на њихову носивост има сама конфигурација, односно начин позиционирања адхерената у односу на правац и смер деловања оптерећења. Она дефинише врсту споја, а самим тим и напоне који се у њему јављају. Као што се на основу поглавља 2.6 и препорука за обликовање адхезионих спојева може закључити, њихова оптимална конфигурација подразумева обезбеђивање преношења силе са једног на други адхерент смицањем слоја адхезива. Међутим, одређена истраживања су показала да се на расподелу напона у слоју адхезива, па самим тим и на носивост споја, може утицати посебним обликовањем адхерената. Мајнц (Meinz) је у [27] закључио како се одређеним обликовањем фасадних лимова могу смањити концентрације напона затежућих адхезионих спојева у

фасадним конструкцијама (слика 3.2). Такође, у [28] је показано да постепено стањивање адхерената у зони преклопа двоструких преклопних спојева доводи до смањења концентрације напона смицања (и до 80%) и готово потпуне неутралисања нормалног напона (напона одљускавања). Промена дебљине адхерената може утицати двојачко на чврстоћу адхезионих спојева, закључено је у [29]. У случају када је адхерент направљен од челика мале чврстоће, односно напона попуштања, повећање његове дебљине може спречити појаву пластичних деформација и тиме утицати на повећање чврстоће самог споја. Код челика високих чврстоћа не долази до појаве пластичних деформација у адхеренту и повећање његове дебљине може довести до повећања концентрације напона у адхезиву, и самим тим и смањење чврстоће споја.



Слика 3.2 Утицај обликовања адхерената на концентрацију напона у адхезионом споју, према [27]

Геометрија слоја адхезива је такође један од фактора који у великој мери утиче на носивост адхезионих спојева. У многим истраживањима је показано да повећање дебљине адхезива доводи до смањења носивости смичућих спојева [30–32], што се углавном приписује већој вероватноћи појаве дефеката у слоју адхезива (шупљина, нечистоћа и сл.), али и већем ексцентрицитету силе, односно моменту савијања у адхезиву. У [33] је у случају затезања регистровано значајније смањење чврстоће са повећањем дебљине слоја адхезива него при деловању силе смицања. То је приписано разлици напонског стања, односно већој концентрацији напона у случају затезућег оптерећења. Поред тога, један од фактора који утичу на чврстоћу адхезионих спојева је и дужина преклопа. Са повећањем дужине преклопа, како затезућих тако и смичућих спојева, долази до повећања површине споја, па самим тим и чврстоће. Резултати

експерименталних истраживања, објављених у [34 и 35], потврђују ову претпоставку. Међутим, показало се да се у тим случајевима повећава сила при којој долази до лома, док се са друге стране смањује чврстоћа споја исказана упросеченим напоном. Разлог за то је чињеница да је концентрација напона на крајевима спојева релативно висока док је вредност напона у средини спојева знатно нижа. Харт-Смит (Hart-Smith) је у [36] закључио да повећање дужине једностраног преклопног споја, након одређене граничне вредности, не доводи до повећања њихове носивости. Овај феномен је у [37] приписан утицају „shear lag“ ефекта. Истраживање у оквиру ове дисертације је спроведено на примерима адхезионих спојева чија су геометрија адхерената и дебљина слоја адхезива применљиви у металним конструкцијама.

У [38 и 39] је показано да присуство шупљина унутар слоја адхезива доводи до смањења чврстоће спојева, као и скраћења века трајања. Стога је веома важно свести их на што мању меру, а по могућству и у потпуности елиминисати. Нарочито је штетно њихово присуство у зонама високе концентрације напона, које може довести до лома и под дејством знатно нижих сила него што је очекивано. У [27] је показано да се оптимизацијом шеме наношења адхезива на адхерент присуство шупљина у слоју адхезива може значајно смањити. Иста шема наношења адхезива је коришћена при испитивању фасадних спојева трапезастог лима, које је спроведено у оквиру овог истраживања. Шупљине у адхезиву не морају, нужно, бити последица његове неадекватне припреме или поступка наношења. У [40 и 41] је присуство шупљина приписано испаравању адсорбоване воде у току периода очвршћавања адхезива, услед пораста температуре приликом одвијања хемијске реакције између двеју компонената. Аутори су показали да се ова појава може у великој мери умањити применом специјалних метода обраде површина адхерената, као што су различити поступци анодизације, што је у већини случајева прилично скупо.

Обрада површине адхерената веома битан фактор који утиче на носивост адхезионих спојева. Основни задатак обраде површина адхерената је да се њоме обезбеди адекватна сила адхезије која омогућује да се локација лома премести унутар самог слоја адхезива, али и допринесе смањењу присуства шупљина у њему. У литератури се код истраживања адхезионих спојева металних адхерената најчешће може срести примена механичког третирања површине шмирглом различитих гранулација или пескарењем (сачмарењем) [39 и 42]. Међутим, веома добре резултате су дале и примене различитих хемијских метода, као што су нагризање површине



одређеним киселинама [43] или третирање силанима [44]. Најчешће се резултати примене неког од третирања површине адхерената анализира кроз утицај на храпавост саме површине. У [17] је истражен утицај топографије површине челичних адхерената и регистрован висок степен корелације између носивости једноструких преклопних спојева и параметара храпавости површине. У [45] је експериментално истражен утицај различитих поступака обраде површине челичних лимова пре спајања: брушење, полирање или само одмашћивање. Закључено је да је само одмашћивање адхерената дало најнеповољније резултате у погледу носивости једноструких преклопних спојева, односно да је за обезбеђивање кохезионог лома неопходно спровести неки од поступака механичке обраде адхерената.

Адхезиви су подложни старењу, односно деградацији механичких својстава у току времена, под утицајем спољашње средине. Са друге стране, њихова својства се мењају и услед дејства различитих врста оптерећења, као што су дуготрајно статичко или циклично оптерећење (оптерећење на замор). Трајност адхезионих спојева најчешће зависи од комбинације дејства повишене температуре, влаге и различитих типова оптерећења [46].

Велики утицај на зависност механичких својстава адхезива од промене температуре има температура преласка у стакласто стање T_g . Она се дефинише као температура при којој својства адхезива као што су реолошке карактеристике, модул еластичности и чврстоћа нагло мењају. При температурама мањим од температуре преласка у стакласто стање адхезиви су крути, чврсти и ограничене дуктилности, док њеним прекорачењем њихова чврстоћа смањује, а дуктилност повећава [46]. У [47–49] је показано да T_g не зависи искључиво од врсте адхезива, већ на њу утичу и примена поступака убрзаног очвршћавања и флукуација температуре у току времена.

У [50] је истражен утицај промене температуре на понашање два типа адхезионих спојева челичних адхерената: смичућих спој дебелих адхерената и једноструки преклопни спој. Адхеренти су пре спајања сачмарени и одмашћени. Закључено је да се са повећањем температуре повећава и дуктилност адхезива, док се његова чврстоћа смањује. Код првог типа споја механизам лома је представљао комбинацију адхезионог и кохезионог типа. Код другог типа споја регистрована је промена механизма лома са порастом температуре из кохезионог (40°C) у адхезиони (80°C). Овој појави су аутори приписали смањење чврстоће споја. Промена механизма лома из кохезионог у

адхезиони је регистрована и при испитивању двоструких преклопних спојева поцинкованих лимова спојених епоксидним и акрилним адхезивом [51].

Обезбеђивање кохезионог лома је веома значајно за адекватно искоришћење потенцијала адхезива. Поред тога, поуздано моделирање адхезионих спојева применом методе коначних елемената и поклапање са експерименталним резултатима најчешће подразумева појаву кохезионог лома при испитивању узорака [52]. У оваквим случајевима адхезионе силе између адхезива и адхерента су довољне да се достигне интензитет оптерећења који изазива напоне у адхезиву у пост-еластичној области, што је израженије код дуктилнијих адхезива. У овој дисертацији је, на основу резултата испитивања утицаја различитих поступака обраде површина на механизам лома, како при нормалним тако и при повишеним температурама (које се могу очекивати у току експлоатације), извршен одабир поступка који обезбеђује адекватну адхезију у експлоатационим условима.

Предвиђања носивости спојева под дејством различитих врста оптерећења морају бити засноване на комбинацији критеријума лома, експерименталног испитивања ради одређивања улазних параметара за прорачун напонско-деформацијског стања и примењених модела за прорачун истог [5]. Критеријуми лома за различите утицаје и врсте спојева сумирани су у [53 и 54]. За одређивање механичких својстава материјала, односно улазних параметара за прорачун напонско-деформацијског стања адхезионих спојева, развијене су различите врсте експеримената, које су детаљно дискутоване у [55–57].

Прорачун напонско-деформацијског стања адхезионих спојева под дејством статичког оптерећења се може вршити на различите начине. У прошлости је велики број истраживања био фокусиран на формулисање аналитичких модела за прорачун напона у слоју адхезива, који су детаљно сумирани у [58].

У новије време већина истраживања укључује нумеричко моделовање адхезионих спојева применом методе коначних елемената. У ту сврху се користе различити софтверски пакети, као што су ABAQUS и ANSYS, али и програми написани у различитим програмским језицима. Користећи линеарно еластични модел адхезива и идеално еластопластични модел адхерената, у [59] истражен је утицај промене димензија површине контакта адхезива и адхерената на концентрације напона у челичним адхерентима двоструких преклопних спојева. Користећи идентичне

параметре материјала, исти аутори су у [60] моделирали понашање „С“ профила израђених од поцинкованог лима, ојачаних адхезионо спојеним плочама од истог материјала. Параметри материјала у [59 и 60] су одређени комбинацијом испитивања двоструких преклопних и чеоних адхезионих спојева. У [61] је применом методе коначних елемената истражен утицај геометријских параметара на понашање једноструких преклопних адхезионих спојева алуминијумских адхерената у пост-еластичној области. За адхеренте је коришћен идеално еластопластични модел материјала, док је еластопластично понашање адхезива представљено Свифтовим моделом (Swift) [62]. У [63] су приказани резултати 2D и 3D нумеричког прорачуна једноструких преклопних спојева под дејством статичког оптерећења. Спојеви су израђени од алуминијумских адхерената и комбинације две врсте адхезива. Мултилинеаран еластопластични модел је коришћен за моделирање адхезива, док су адхеренти моделирани билинеарним идеално еластопластичним моделом. У анализи је примењен фон Мизесов услов течења. Аутори су закључили да су прорачуном 3D модела добијени поузданији резултати, док се 2D показао неконзервативним у том случају. У [64] је моделиран двоструки преклопни спој, при чему је адхезив представљен мултилинеарном кривом напон-деформација, добијеном експерименталним испитивањем монолитних епрувета адхезива. Резултати прорачуна су били задовољавајући. У овом истраживању је, применом методе коначних елемената, спроведен нумерички прорачун напонско-деформацијског стања двоструког преклопног споја и фасадног споја трапезастог лима са Т-профилом под дејством статичког оптерећења. При томе су параметри материјала одређени комбиновањем резултата испитивања чеоних спојева оптерећених на затезање и двоструких преклопних спојева оптерећених на смицање затезањем.

Понашање адхезионих спојева металних адхерената под дејством цикличног оптерећења је веома мало истражено. При томе, већина истраживања је спроведена на спојевима алуминијумских адхерената. Међутим, показало се да се, у случајевима у којима је регистрован кохезиони лом, адхезиони спојеви металних адхерената често понашају слично као адхезиони спојеви композитних адхерената. Преглед доступних модела, као и предлог нових модела и метода за описивање понашања адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења, развијених у оквиру ове дисертације, приказан је у поглављу 5.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ И МОДЕЛИРАЊЕ АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА ПОД ДЕЈСТВОМ СТАТИЧКОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

Адхезионо спајање, упркос чињеници да је пре више од 60 година по први пут успешно примењено у грађевинарству, још увек није у пуној мери афирмисано у металним конструкцијама. Разлог за то је, између осталих, недостатак стандардизованих поступака испитивања материјала, израде спојева и прорачуна истих. Већина развијених поступака испитивања и важећих стандарда се односе на адхезионе спојеве карактеристичне за ауто и авио индустрију. Њих карактерише веома мала дебљина слојева адхезива, а у појединим случајевима и веома скупи поступци припрема површина адхерената које није могуће применити у грађевинској индустрији. Тачност прорачуна адхезионих спојева у великој мери зависи од експериментално одређених параметара материјала. Механичка својства адхезива се могу одредити помоћу ливених монолитних епрувета или узорака адхезионих спојева. Познато је да се адхезиви ван споја понашају другачије него када су део споја, па је због тога препоручљиво је да се њихови параметри одређују испитивањем узорака спојева. Предуслов за правилно утврђивање механичких својстава адхезива у споју јесте обезбеђивање довољне адхезије, односно кохезионог лома споја приликом испитивања.

С обзиром на искуства из ауто и авио индустрије, намеће се закључак да би идеално поље примене адхезива била израда спојева у лаким металним конструкцијама. Пут до стандардизације прорачуна и употребе адхезионих спојева у подразумева утврђивање понашања спојева под дејством статичког оптерећења, карактерисање њихове стохастичке природе, као и утицаја температуре, влаге и различитих типова оптерећења на промену њихових својстава. Са друге стране, веома важно различита експериментална истраживања усмерити ка сличним узорцима, чији је избор резултат у пракси препознате потребе за употребом адхезионог спајања.

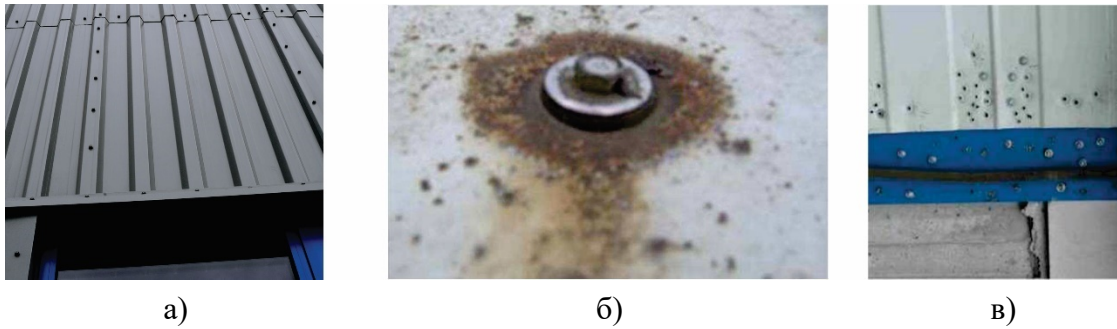
У овом поглављу извршно је експериментално испитивање два типа спојева лаким металних конструкција под дејством статичког оптерећења: спој трапезастог

фасадног лима за носећу конструкцију, оптерећен на затезање, и двоструки преклопни спој оптерећен на смицање затезањем. Разлози за одабир ова два типа спојева ће бити појашњени у даљем тексту овог поглавља. Резултати испитивања адхезионих спојева под дејством статичког оптерећења уједно представљају и полазну основу за испитивање њиховог понашања под дејством цикличног оптерећења. Осим понашања поменутих спојева, испитана је могућност поузданог одређивања механичких својстава материјала на основу комбиновања резултата испитивања чеоних и двоструких преклопних спојева. Ови типови експеримената не спадају у стандардне поступке одређивања механичких својстава адхезива, поготово у пост-еластичној области. Тачност одређених својстава материјала верификована спровођењем нумеричког прорачуна напонско-деформацијског стања адхезионих спојева и поређењем са експерименталним резултатима.

4.1 Фасадни спој трапезног профилисаног лима за носећу конструкцију

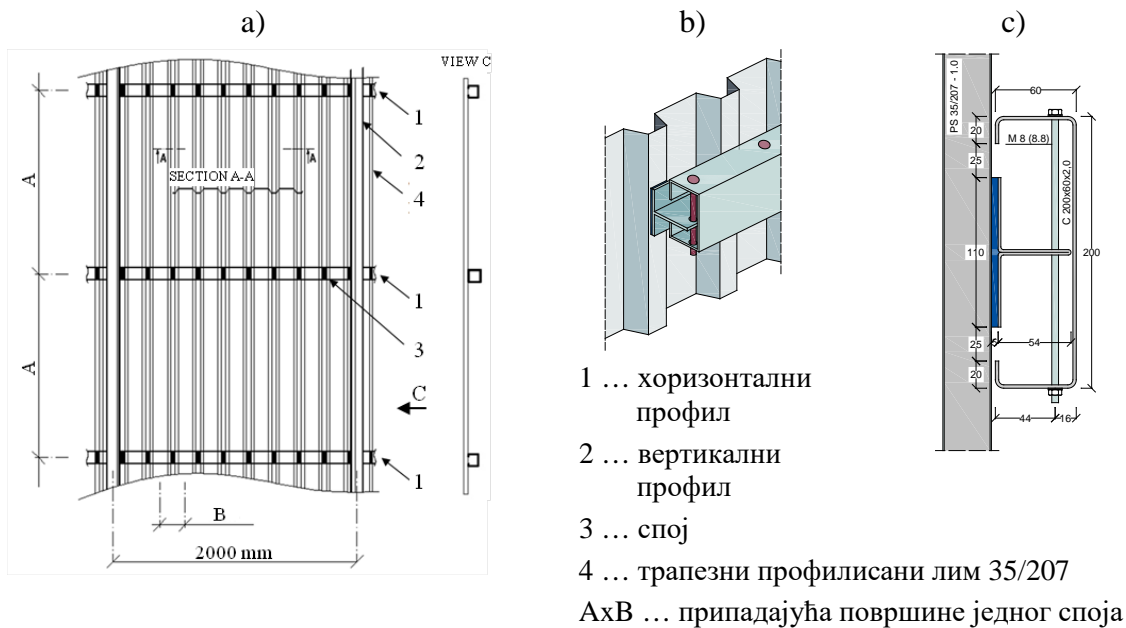
Трапезасти профилисани лимови се често користе за облагање индустријских објеката и хала. На носећу конструкцију објекта поставља се лака метална или дрвена потконструкција, за коју се различитим спојним средствима везује облога од трапезастог лима. Ови спојеви се изводе применом механичких спојних средстава (завртњева, ексера, анкера, држача и др.) којима се сопствена тежина фасаде и дејство ветра преносе на подконструкцију. Примена оваквих спојних средстава носи са собом одређене недостатке, као што су:

- нарушена естетика фасадне конструкције услед видљивости спојних средстава (слика 4.1а),
- нарушен ефекат самочишћења фасаде због присуства глава спојних средстава,
- појава флека од рђе као последица задржавања воде услед прекида континуитета површине главама спојних средстава (слика 4.1б),
- видљиве рупе, огреботине или улубљења на фасади услед грешака у монтажи (слика 4.1в).



Слика 4.1 Недостаци употребе механичких спојних средстава код спајања трапезастих лимова фасадне конструкције [65]

Поменути недостаци употребе механичких спојних средстава се могу отклонити применом адхезионог спајања. То је илустровано на примеру из праксе, приказаном на слици 4.2, који представља структуралну фасаду са облогом од трапезастог лима. За главне вертикалне профиле везани су хоризонтални секундарни профиле (C200x60x2), који служе за пријем хоризонталног оптерећења које делује на конструкцију преко површине фасадног лима. Спој фасадног лима за хоризонталне



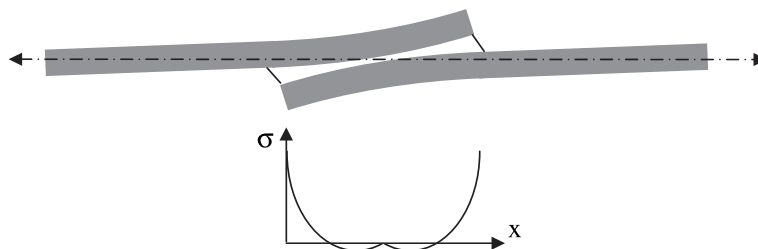
Слика 4.2 Структурална фасадна конструкција – примена адхезионих спојева [66]

профиле изводи се помоћу прикључних Т-профила од поцинкованог лима. Они су са трапезним профилисаним лимом спојени применом адхезионог спајања, док се са хоризонталним профилима веза остварује завртњевима. Адхезиони спојеви служе искључиво за пријем хоризонталног оптерећења од ветра. Сопствена тежина профилисаног лима се прихвата посебним хоризонталним профилем, чија веза је са

трапезастим лимом изведена директно, без употребе Т-профила и адхезива. Разлог за то је намера да се избегне сложено напонско стање у адхезиву, као и утицај пузања услед дејства дуготрајног статичког оптерећења, које у току времена може значајно утицати на носивост споја и довести до превременог отказа. Да би се спречила појава додатног оптерећења услед термичког ширења и скупљања фасадног лима, спојеви прикључних Т-профила са хоризонталним носачима се изводе тако да је омогућено њихово вертикално померање у правцу завртњева. Овако приказано решење структуралне фасадне конструкције омогућава њену радионичку израду, што је веома значајно за примену адхезионог спајања.

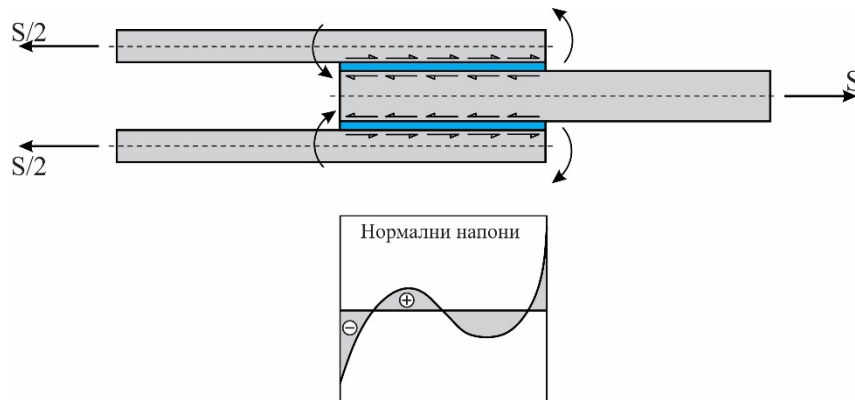
4.2 Смичући спој

Употреба адхезионих спојева у грађевинској пракси се често везује за ојачање елемената конструкције спајањем додатних плоча од метала или влакнастих композита. У оваквим случајевима пренос оптерећења се одвија на начин какав се јавља у преклопним спојевима. Преклопни спојеви представљају најефикаснији и уједно, у грађевинској пракси, најзаступљенији тип адхезионих спојева. При томе, највећа чврстоћа оваквих спојева се постиже уколико се конструктивним мерама обезбеди најмања могућа вредност компоненте нормалних напона, која се јавља у скоро свим типовима адхезионих спојева. У случају једноструких преклопних спојева, оптерећених на смицање затезањем, долази до појаве момента савијања услед утицаја ексцентрицитета сила и деформације адхерената (слика 4.3). Резултат тога је појава концентрације нормалних напона управних на раван контакта адхерената и адхезива. У појединим случајевима они могу на крајевима преклопа достићи и веома велике вредности. Ова појава се може ублажити применом двоструких преклопних спојева [67] (слика 4.4). Међутим, различита истраживања су показала да се ни у таквим случајевима присуство нормалних напона не може у потпуности елиминисати [68].



Слика 4.3 Расподела нормалних напона у деформисаном једноструком преклопном споју, према [58]

Понашање преклопних адхезионих спојева је било предмет различитих истраживања претходних деценија. Утицаји различитих фактора на њихова својства (пре свих чврстоћу), промене својстава у току експлоатације и век трајања су били експериментално истраживани, при чему је развијен велики број различитих метода испитивања. Опсежан приказ ових метода је објављен у [69].



Слика 4.4 Расподела нормалних напона код двоструких преклопних спојева

Експериментално испитивање једноструких смичућих спојева је једно од најстандарднијих у области адхезионог спајања. Разлог за то је чињеница да је почетак и развој примене адхезива везан за авио индустрију, где се овај тип спојева веома често примењује. За разлику од авио индустрије, примену адхезива у грађевинским конструкцијама карактерише уједначенија расподела напона, каква се јавља у двоструким преклопним спојевима. Они се најчешће користе за испитивање чврстоће на смицање адхезива. Смичућа својства адхезива се, према стандарду СРПС ЕН 14869-1:2012 [70], одређују испитивањем на смицање адхезионих спојева дебелих адхерената. Међутим, у [60] показано да се смичућа својства адхезива (модул смицања), добијена испитивањем двоструких преклопних спојева, могу са успехом користити при извођењу нумеричких прорачуна и предвиђању носивости ојачаних челичних греда у лаким металним конструкцијама. Међутим, у поменутом истраживању напони у адхезиву су се налазили у области еластичности.

У овој дисертацији је извршено експериментално испитивање двоструких преклопних спојева адхерената од поцинкованог лима. На основу резултата експерименталног испитивања овог типа споја одређени су параметри материјала адхезива како у еластичној, тако и у пост-еластичној области. Њихова поузданост је

верификована поређењем експерименталних резултата са резултатима нумеричких прорачуна.

Овај тип споја је одабран из више разлога:

- Једноставна и релативно брза израда у поређењу са испитивањем адхезионих спојева дебелих адхерената.
- Нису неопходне специјалне направе и поступци за спајање и фиксирање узорака.
- Напонско стање оваквих спојева је сличније напонском стању које се јавља код адхезионих спојева у грађевинарству (поготово код гредних ојачања) у поређењу са напонским стањем једноструких преклопних спојева.
- Једноставније обезбеђивање геометрије слоја адхезива у споју.
- У случају испитивања споја дебелих адхерената, чија је дужина преклопа према [70] једнака 5mm, однос дужине и дебљине слоја адхезива (5:1) је исувише низак (у неким случајевима се препоручује и преко 20:1, видети [71]).

4.3 Материјал

4.3.1 Поцинковани лим

Поцинковани лимови имају веома широку примену у индустријским гранама у којима је отпорност на корозију од великог значаја. У грађевинарству се најчешће употребљавају за израду кровова, фасада и олука. Израђују се помоћу хладноваљаних лимова од нискоугљеничних челика. Облажу се поступком топлог наношења превлаке цинка са обе стране лима, континуираним провлачењем кроз растопину који садржи минимум 99% цинка. Доступни су у виду равних плоча или као трапезоидно профилисани лимови. Трапезоидно профилисани лимови се користе за облагање кровова и зидова свих врста грађевинских објекта. Израђују се као једноструке покривке или сендвич панели, у комбинацији са минералном вуном или полиуретаном.

Спецификације поцинкованих лимова су прописане стандардом СРПС ЕН 10346:2016 [72], где су дефинисане ознаке за квалитет челика: D×51D +Z до D×57D +Z (ознака "+Z" дефинише врсту превлаке - цинк). У експерименталном истраживању у оквиру ове дисертације коришћен је поцинковани лим квалитета D×51D +Z. Овај тип

се најчешће користи за израду кровова и фасада. Обрађује угаоним савијањем до величине угла $\leq 90^\circ$.

4.3.2 Адхезиви

У оквиру овог истраживања коришћене су три различите врсте адхезива: акрилни, епоксидни и полиуретански. У прелиминарном истраживању, које је спроведено ради одабира адекватног поступка припреме површина адхерената пре спајања и формулације адхезива, експериментална испитивања су спроведена на адхезионим спојевима израђеним помоћу све три наведене врсте. Већина каснијих истраживања је спроведена коришћењем акрилног адхезива.

На избор ове формулације у највећој мери су утицала три фактора: чврстоћа, време достизања радне чврстоће и отпорност на атмосферске утицаје (повишену температуру и влажност). Чврстоћа адхезива у највећем броју случајева представља један од основних критеријума на основу којих се врши њихов избор. Међутим, почетни резултати истраживања, приказани у поглављу 4.5, показали су да разлика чврстоћа испитаних фасадних спојева изведених применом три наведене формулације није значајна. У складу са тим, при избору врсте адхезива који је употребљен у највећем делу експерименталног истраживања, предност је дата осталим критеријумима. Како је у поглављу 2.3 истакнуто, епоксиде карактерише знатно дуже време очвршћавања, у односу на акрилне и полиуретанске системе. Овај фактор је од веома великог значаја за примену у грађевинским конструкцијама. С обзиром на уобичајене дебљине слојева адхезива, свако померање адхерената (па и минимално) у току периода очвршћавања може довести до стварања трајних оштећења у њему. Ради извођења квалитетног споја неопходно је обезбедити непомерљивост његових компонената до тренутка постизања радне чврстоће, односно тренутка када спој може примити одређено оптерећење. Имајући то у виду, предност у грађевинарству имају адхезиви који брже (али не и пребрзо) очвршћавају. Време очвршћавања се може скратити загревањем спојева, што најчешће веома компликовано извести, имајући у виду димензије елемената грађевинских конструкција. Све напред наведено, као и чињеница да је показао бољу постојаност при повишеним температурама (видети поглавље 4.5), утицало је на то да се акценат у експерименталном истраживању стави на примену акрилног адхезива.



Врсте адхезива коришћених у истраживању, као и њихове главне карактеристике приказани су у табели 4.1.

Табела 4.1 Карактеристике адхезива коришћених у експерименталном истраживању

Производ	Lord 410GB	Sika Power -477	Körapur 842
Тип	Акрилни	Епоксидни	Полиуретански
Боја	драп/зелена	црвена	беж
Однос мешавине	3:1 (маса) 4:1 (запремина)	2:1	5:1 (маса) 4:1 (запремина)
Време до постизања радне чврстоће	60 мин. (0,35МПа)	60 мин.	3-4 ч.
Време очвршћавања	24-72ч. собна температура	7 дана собна температура	12h (90% чврстоће) собна температура
Време руковања	20-30 мин.	60 мин.	20 мин.

4.4 Утицај поступка обраде на карактеристике површине адхерената

Да би се израдио квалитетан спој одговарајуће чврстоће, у већини случајева је неопходна посебна обрада површина адхерената пре самог спајања. Њоме се обезбеђује адекватно функционисање механизма адхезије, односно спречава адхезиони лом споја. У последње време, већина произвођача адхезива препоручује различите врсте механичких обрада површина које одговарају њиховим производима. Механичком обрадом површина се уклањају нечистоће и повећава храпавост адхерената.

У оквиру овог истраживања експериментално је испитан утицај два карактеристична поступка обраде површина адхерената од поцинкованог лима на носивост адхезионих спојева, као и на механизам њиховог лома. Типови обраде површина су одабрани на основу резултата испитивања храпавости површина обрађених различитим механичким поступцима, које је спроведено применом конфокалне микроскопије.

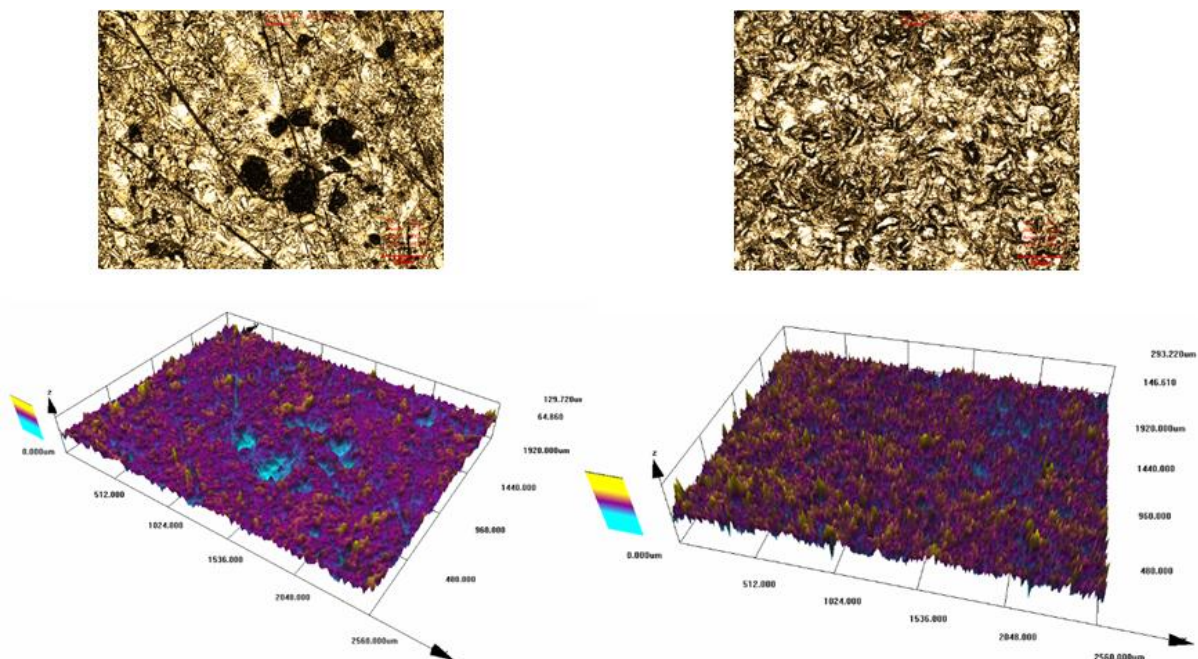
4.4.1 Храпавост површине адхерената

Храпавост површине је свеукупност микро-геометријских неправилности на површини предмета, које су проузроковане поступком обраде или неким другим

утицајима. Она се квантитативно оцењује мерењем микро-геометрије дела површине, довољно малог да елиминише утицаје геометријских макро-имперфекција адхерената.

Ради избора поступака обраде површина адхерената пре спајања, применом конфокалне микроскопије, испитане су хрпавости површина узорака обрађених поступцима приказаним у табели 4.2. Ова метода, која према стандарду СРПС ЕН ИСО 25178-6:2013 [73] спада у стандардне методе мерења површинских текстура, омогућава реконструисање 3D слике и анализу текстуре површина испитиваних узорака. На узорцима величине 10x10x5mm анализирано је по 5 сегмената површине, димензија 2,5x2mm. Површине посматраних сегмената снимљене су и анализиране помоћу конфокалног микроскопа Olympus Fluoview FV1000. Примери снимака поцинкованог узорка без механичке обраде и узорка обрађеног сачмарењем су приказани на слици 4.5.

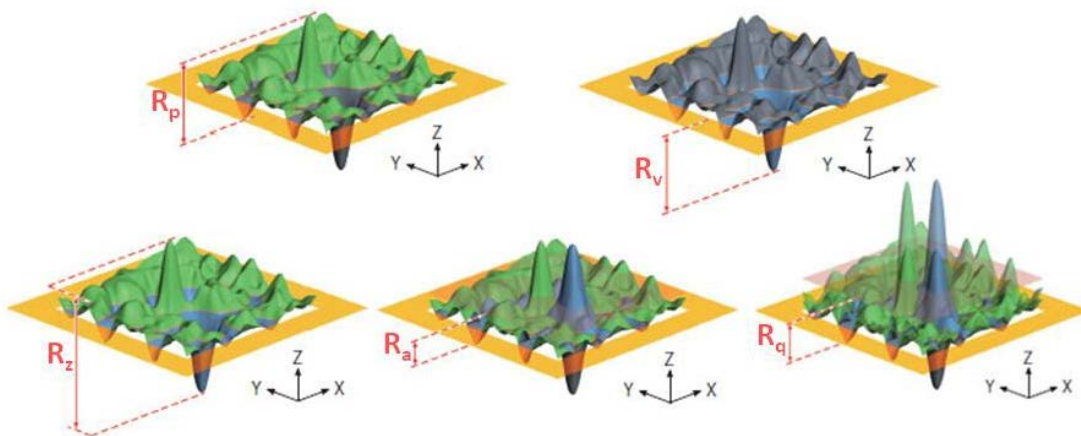
Величине на основу којих је вршена квантитативна оцена хрпавости површине, дефинисане су стандардом СРПС ЕН ИСО 4287:2014 [74] и илустроване на слици 4.6. Оне представљају главне параметре површинске текстуре. Резултати анализе текстуре посматраних механички обрађених површина приказани су на слици 4.7.



Слика 4.5 Увећане слике и 3D модели површина: а) поцинковани лим без механичке обраде; б) сачмарена површина

Табела 4.2 Типови обраде површина

Бр	Начин обраде површине
1	Поцинковани лим, очишћен од масноћа, без механичке обраде
2	Брушење брусним папиром гранулације Р60
3	Брушење брусним папиром гранулације Р150
4	Брушење брусним папиром гранулације Р240
5	Сачмарење челичном сачмом величине 0,4mm, тврдоће HV 600



Слика 4.6 Параметри површинске текстуре, преузето из [75] и модификовано

R_p - Максимална висина врха профила - највећа висина врха профила Z_p на посматраној површини.

R_v - Максимална дубина дна профила - највећа дубина дна Z_v на посматраној површини.

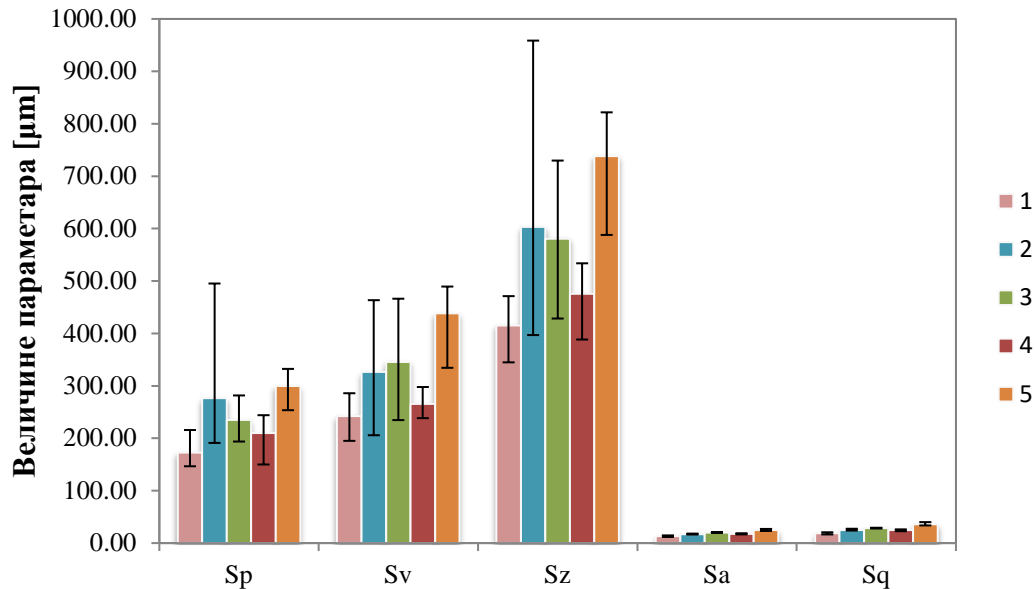
R_z - Максимална висина профила - збир највеће висине врха Z_p и највеће дубине дна профила Z_v на посматраној површини.

R_a - Средње аритметичко одступање мерене површине - аритметичка средина апсолутне ординате вредности $Z(x,y)$ на површини узорка, дата изразом:

$$R_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (4.1)$$

R_q - Средње квадратно одступање мерене површине - вредност средњег корена ординате вредности $Z(x,y)$ на површини узорка дато изразом:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (4.2)$$



Слика 4.7 Вредности параметара површинске текстуре за након обрада површина поступцима наведеним у табели 4.2.

На основу резултата анализе параметара површинске текстуре, приказаних на слици 4.7 уочава се да је храпавост површине обрађене сачмарењем највећа, док је у случају поцинкованог лима без механичке обраде површине она најмања.

4.5 Експериментално истраживање утицаја обраде површина на чврстоћу фасадног споја и механизам лома

У случају адхезионих спојева поцинкованих лимова може доћи до појаве адхезионог лома [76,77]. Из тог разлога је пре употребе адхезионог спајања веома значајно утврдити да ли одабрани поступак припреме површина обезбеђује адекватну адхезију, па самим тим и кохезиони лом споја. У оквиру овог поглавља су приказани резултати испитивања утицаја поступака припреме површина на чврстоћу спојева и механизам лома [66]. С обзиром да затезање представља један од најнеповољнијих типова оптерећења, како у погледу чврстоће спојева тако и у погледу механизма лома, одабрано је да се испитивање спроведе на примеру фасадних спојева, приказаних у поглављу 4.1. За анализу су одабрана два карактеристична поступка припреме површине, детаљно описана у табели 4.3. Испитивања су спроведена на собној температури (22°C), при чему је један део узорака кондициониран на температури од

80°C, што представља максималну температуру фасаде која се остварује у летњем периоду [78].

Табела 4.3 Поступци припреме површина за спајање

Бр	Поступак припреме површина адхерената
ПП1	Без механичке обраде (само одмашћивање): <ul style="list-style-type: none">- Одмашћивање површине адхерената ацетоном (2 пута)- Уклањање прашине ваздухом под притиском
ПП2	<ul style="list-style-type: none">- Одмашћивање површине адхерената ацетоном- Сачмарење челичном сачмом величине 0,4mm, тврдоће HV 600- Уклањање прашине ваздухом под притиском- Одмашћивање механички обрађене површине адхерената ацетоном (2 пута)- Уклањање прашине ваздухом под притиском

Разлози за одабир наведених поступака припреме површина су следећи:

ПП1

- Код поцинкованих елемената се не препоручује механичка обрада површина, јер се њоме делимично или у потпуности уклања слој цинка, чија је основна функција заштита елемената од корозије.
- У неким истраживањима је одмашћивање поцинкованог лима било довољно за обезбеђивање кохезионог механизма лома.

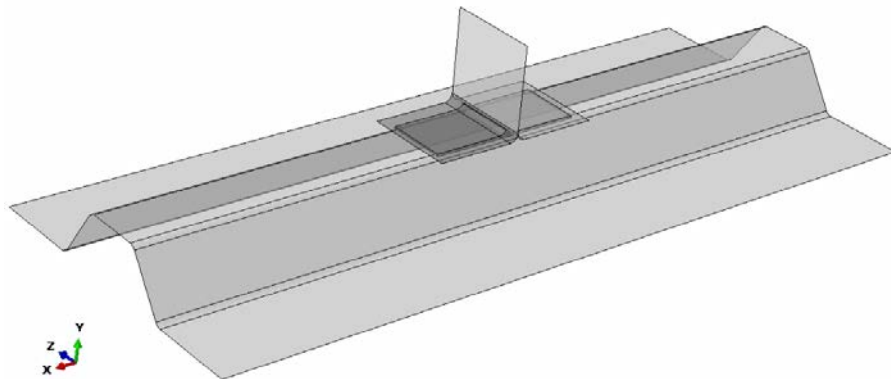
ПП2

- Обрадом сачмарењем се постиже највећа храпавост површина адхерената.
- Прелиминарна истраживања су показала да механичке обраде површина брушењем, којима се такође постиже повећана храпавост адхерената, не обезбеђују значајнију разлику у погледу чврстоће спојева и механизма лома у односу на поступак ПП1.

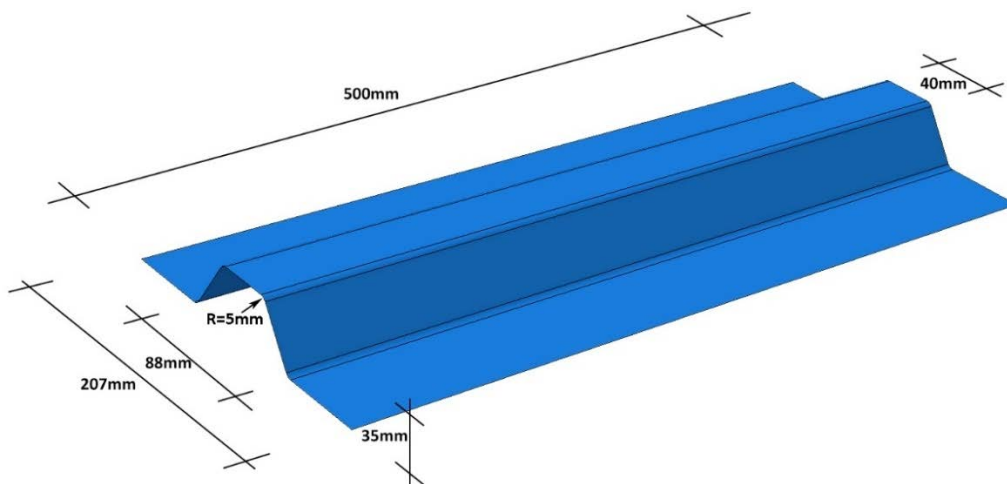
4.5.1 Геометрија споја

Геометрија испитаних фасадних спојева, дефинисана са циљем да симулира реалне услове у фасадној конструкцији, приказана је на слици 4.8. Димензије адхерената су приказане на сликама 4.9 и 4.10. Испитивана је веза једног прикључног Т-профила за ребро трапезастог лима, при чему је претпостављено да се спој поставља

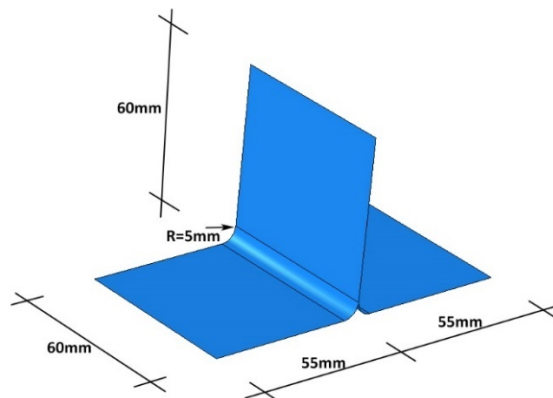
на сваком ребру. Припадајућа ширина трапезастог лима је 207mm, а дужина 500mm. Дужина је приближно једнака растојању између нултих тачака дијаграма момената савијања континуалне греде на 3 поља, распона поља $l=1m$. Оваквом геометријом је симулиран случај спајања табле трапезастог лима дужине 3m, при чему се спојеви остварују на сваких 1m растојања. Димензије слоја адхезива 40x100x1mm.



Слика 4.8 Геометрија испитаних узорака



Слика 4.9 Димензије трапезастог лима



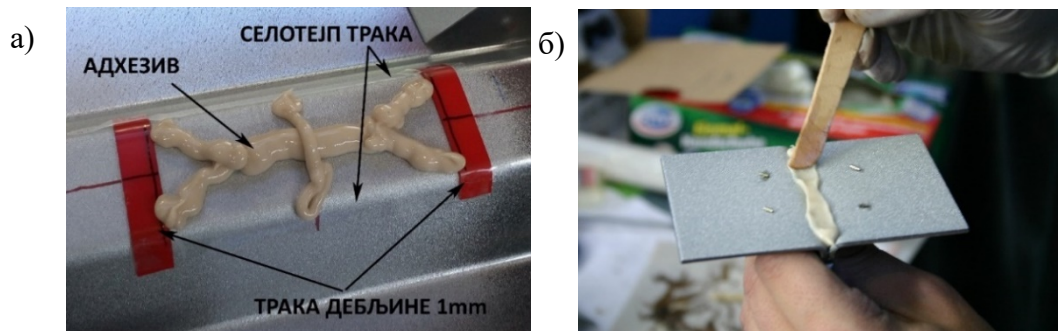
Слика 4.10 Димензије прикључног Т-профила

4.5.2 Израда споја

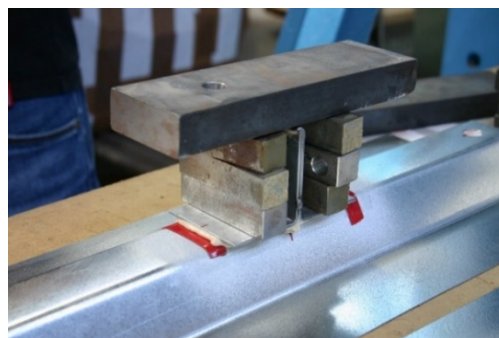
Наношење адхезива је изведено на начин (слика 4.11а) који омогућује минималну појаву мехурића ваздуха у слоју адхезива након постављања Т-профила. Више детаља о избору начина наношења адхезива се може наћи у [27]. Ради обезбеђивања димензија слоја адхезива, на међусобном растојању од 100mm у правцу ребра, постављене су самолепљиве траке дебљине 1mm. На косим странама трапезастог лима су залепљене селотејп траке, које онемогућавају његов контакт са вишком адхезива истиснутим приликом монтирања споја. Дебљина адхезива је додатно осигурана постављањем ситних комада жице дебљине 1mm на површину Т-профила (слика 4.11б), што је један од стандардних поступака при изради експерименталних узорака адхезионих спојева [79,80].

Серије узорака су израђене помоћу адхезива наведених у табели 4.1. Након монтирања, узорци су фиксирани теретом (слика 4.12) и остављени на собној температури до завршетка периода очвршћавања, према упутствима произвођача.

Одређени број узорака је пре испитивања кондициониран на температури од 80°C. Кондиционирање је обављено тако што су узорци постављени у клима-комору, загрејану на температуру од 80°C, у којој су били изложени константној температури у трајању од 24ч.



Слика 4.11 Наношење адхезива: а) трапезасти лим; б) Т-профил



Слика 4.12 Фиксирање споја теретом

4.5.2 Испитивање узорака фасадних спојева

Испитивање узорака је спроведено помоћу универзалне кидалице Shimadzu Autograph (слика 4.13б), максималног опсега силе 250kN, са компјутерском аквизицијом података. Фиксирање трапезастог лима на оба краја је извршено помоћу U-профила, причвршћених завртњевима за конструкцију кидалице (слика 4.14). Да би се омогућила употреба завртњева, на оба краја трапезастог лима су избушене рупе пречника 20mm. Наношење оптерећења је извршено преко помоћне конструкције, повезане са чељусти кидалице (слика 4.14). Оптерећење је наношено у померањем чељусти константном брзином од 10mm/min. Брзина померања чељусти је одређена према стандарду за испитивање адхезионих чеоних спојева затезањем [81], који прописује да испитивање затезањем треба спровести тако да лом споја настане након 60 ± 20 s.

Испитано је 10 серија по 3 узорка, сумираних у табели 4.4. Кондиционирани узорци су испитани непосредно након вађења из клима-коморе. При томе је посебна пажња посвећена томе да се ова испитивања спроведу што је брже могуће, како не би дошло до значајног губитка температуре у адхезиву. У случају Kōgarur 842 адхезива, испитивање није спроведено на узорцима код којих је примећен поступак припреме површина ПП1, јер је већ било познато да тај поступак није одабран за даље истраживање.

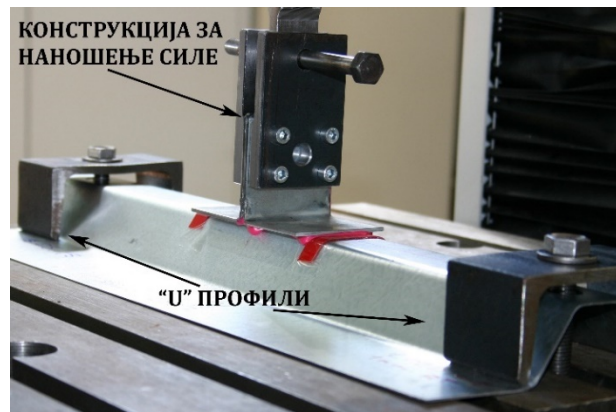


Слика 4.13 Уређаји за кондиционирање и испитивање затезањем:

а) клима-комора б) универзална серво-хидраулична кидалица

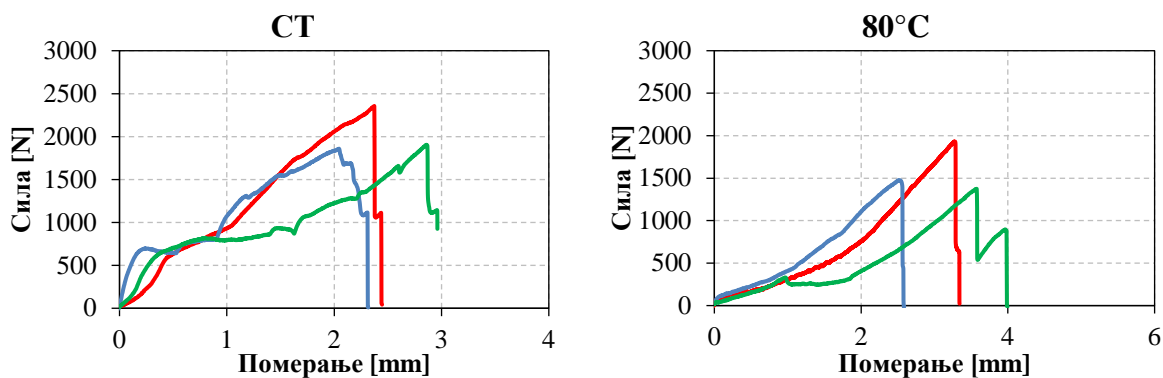
Табела 4.4 Серије испитаних узорака

Адхезив		Lord 410GB		Sika Power -477		Körapur 842	
Температура		СТ	80°C	СТ	80°C	СТ	80°C
Припрема површин	ПП1	3	3	3	3	-	-
	ПП2	3	3	3	3	3	3

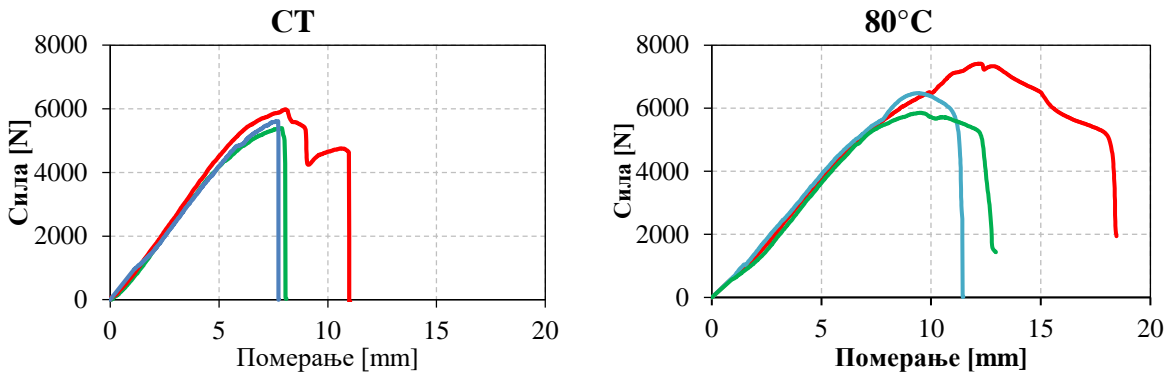


Слика 4.14 Диспозиција при испитивању фасадног споја под дејством статичког оптерећења

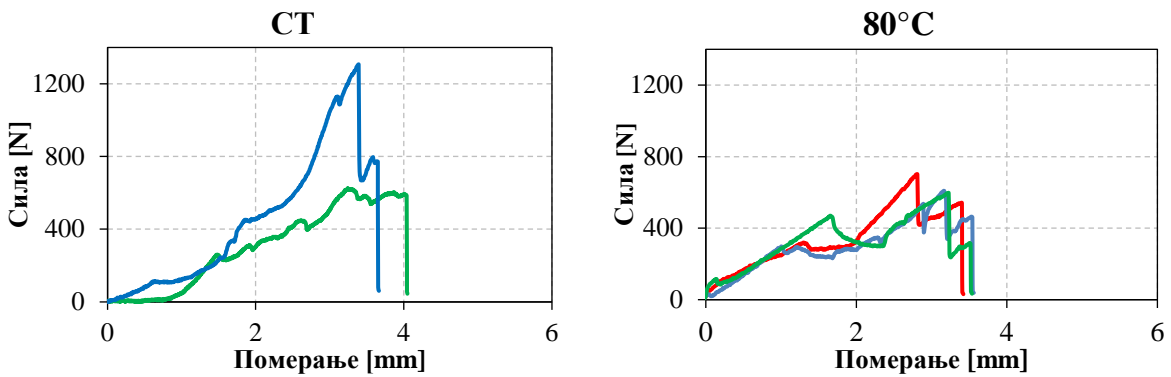
Резултати испитивања су приказани помоћу дијаграма сила-померање на сликама 4.15 - 4.19. На апсциси је приказано регистровано померање чељусту кидалице. С обзиром на димензије конструкције за наношење оптерећења и интензитет сила које су током испитивања деловале на узорке, у даљој анализи се подразумева да је оно једнако померању ребра Т-профила, односно тачака у којима је подразумеван пренос оптерећења на њега. На ординати је приказана регистрована сила којом је деловано на узорак.



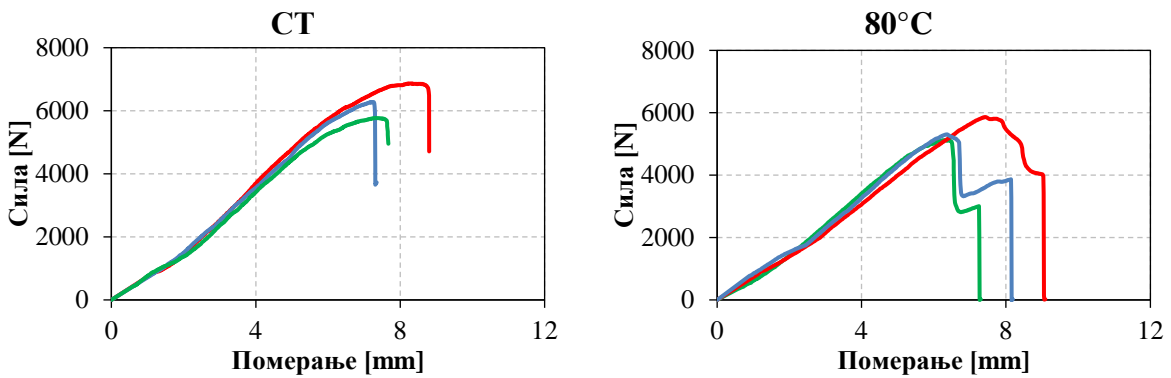
Слика 4.15 Дијаграм сила-померање – Lord 410 GB – ПП1



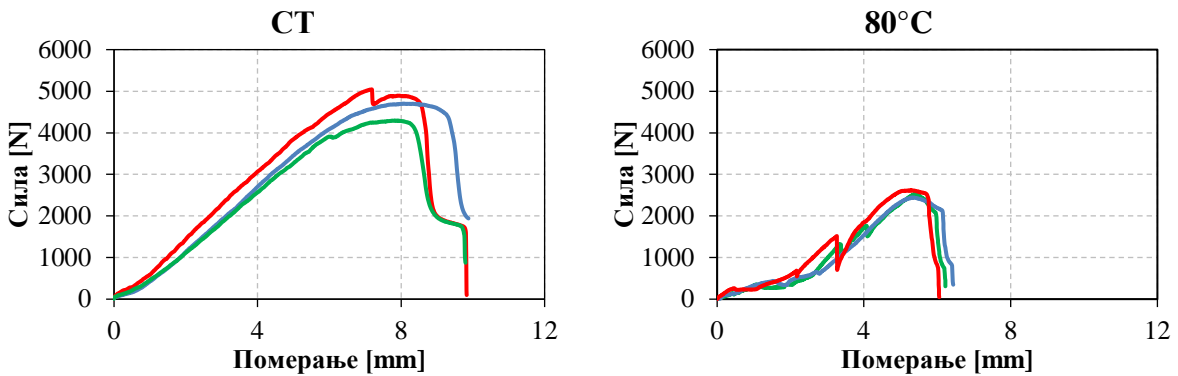
Слика 4.16 Дијаграм сила-померање – Lord 410 GB – ПП2



Слика 4.17 Дијаграм сила-померање – Sika Power -477 – ПП1



Слика 4.18 Дијаграм сила-померање – Sika Power -477 – ПП2



Слика 4.19 Дијаграм сила-померање – Kögarur 482 – ПП2

На основу експерименталних резултата приказаних на сликама 4.15 - 4.19, срачунате су средње вредности чврстоћа спојева, које су приказане у табели 4.5. Ознаке испод вредности чврстоћа спојева представљају механизам лома који је регистрован код испитаних узорака, при чему је:

А – адхезиони лом

К – кохезиони лом

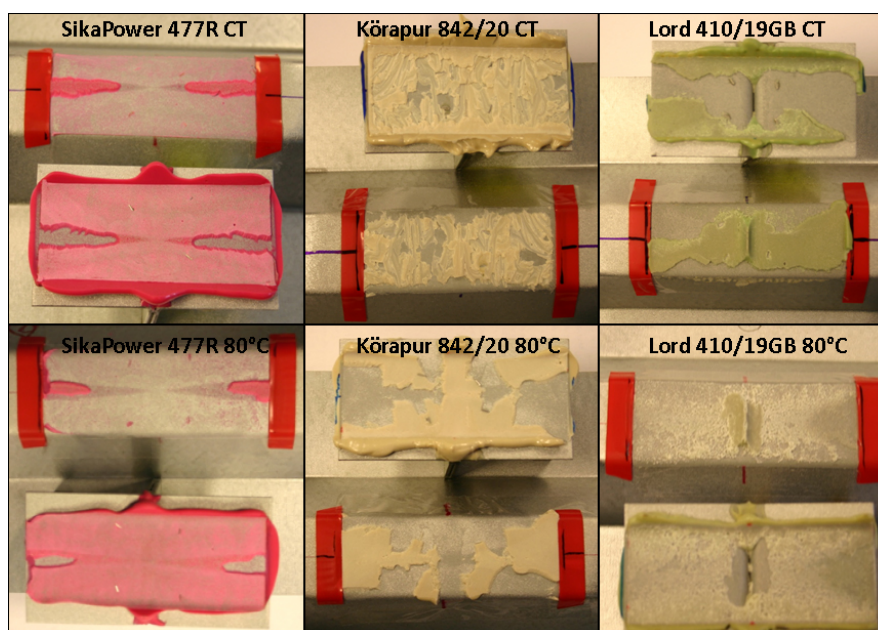
СК – специјални кохезиони лом

С – лом адхерента

Механизми лома који су регистровани на узорцима припремљеним поступком ПП2 приказани су на слици 4.20.

Табела 4.5 Средње вредности чврстоћа и механизми лома испитаних узорака фасадних спојева

Адхезив		Lord 410GB		Sika Power -477		Körapur 842	
		СТ	80°C	СТ	80°C	СТ	80°C
Припрема површина	ПП1	1,92kN	1,62kN	0,97kN	0,64kN	-	-
		А	А	А	А	-	-
	ПП2	5,66kN	6,68kN	6,3kN	5,35kN	4,84kN	2,52kN
		СК+С	К	СК	СК	К	А



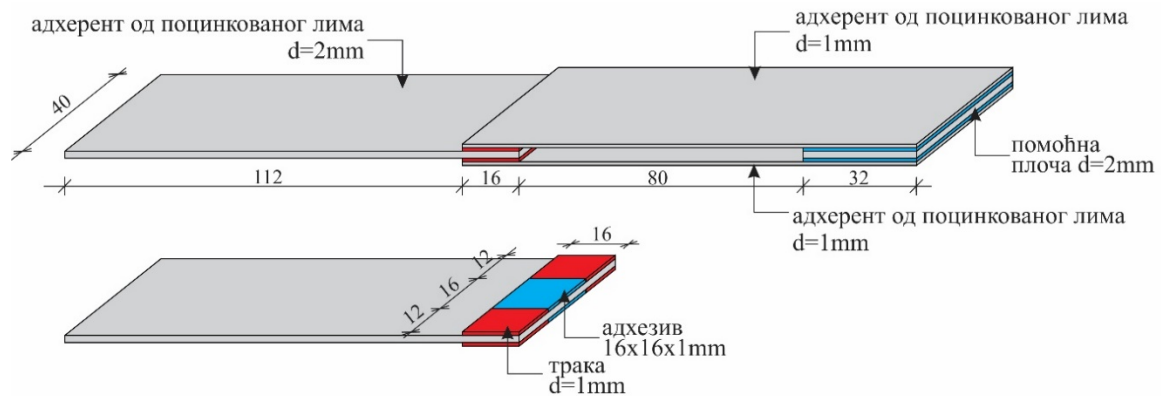
Слика 4.20 Механизми лома испитаних узорака фасадних спојева

На основу резултата испитивања може се закључити да поступак обраде ПП1 не обезбеђује довољну адхезију између адхезива и адхерената, што је резутовало адхезионим ломом у свим случајевима. Већ при веома малим интензитетима сила долази до прекида линеарности дијаграма сила-померање, што указује на почетак адхезионог лома на појединим деловима споја. Поступак обраде ПП2 је у скоро свим случајевима резутовао кохезионим или специјалним кохезионим ломом и знатно већим чврстоћама спојева. Чињеница да је и у случају узорака кондиционираних на 80°C обезбеђена добра адхезија указује на то да се овај поступак обраде може показати адекватним у условима какви се очекују у експлоатационом веку фасадних конструкција. Због свега наведеног, даља испитивања у оквиру ове дисертације су спроведена на узорцима обрађеним поступком ПП1.

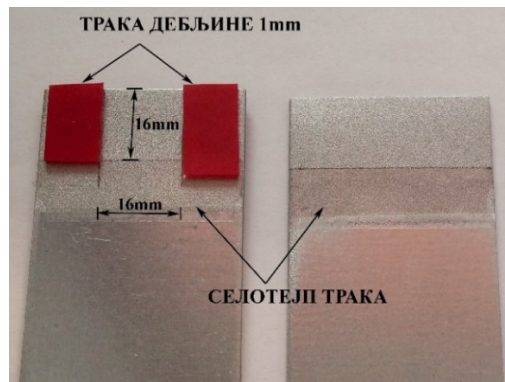
4.6 Испитивање двоструких преклопних спојева оптерећених на смицање

Испитивање понашања адхезионих спојева оптерећених на смицање је спроведено на примеру двоструког преклопног споја, приказаног на слици 4.21. Спојеви исте геометрије су у [12] успешно коришћени за испитивање чврстоће на смицање, али и одређивање механичких својстава адхезива, која су касније коришћена за нумеричку анализу напонско-деформацијског стања ојачаних С профила. Како је већ напоменуто, за разлику од поменутог истраживања у коме је адхезив моделиран као линеарно еластичан материјал, у овом истраживању су резултати експерименталног испитивања коришћени за одређивање параметара материјала у пост-еластичној области. Адхеренти су израђени од поцинкованог лима. Дебљине унутрашње и спољашњих плоча су 2mm и 1mm, респективно. Површине адхерената су обрађене сачмарењем (поступак ПП1). За спајање је коришћен адхезив Lord 410GB. Димензије слоја адхезива су 16x16x1mm. Начин обезбеђивања димензија адхезива је приказан на слици 4.22. Дебљина слоја је обезбеђена коришћењем истих трака као и у случају фасадних спојева. Контакт елемената од поцинкованог лима са вишком адхезива, истиснутим приликом монтирања споја, спречен је коришћењем селотејп трака. Приликом израде, у корацима у којима је то било могуће учинити, истиснути адхезив је уклањан са узорака. Паралелност спољашњих и унутрашње плоче је обезбеђена коришћењем помоћне плочице димензија 32x40x2mm, која је са спољашњим плочама

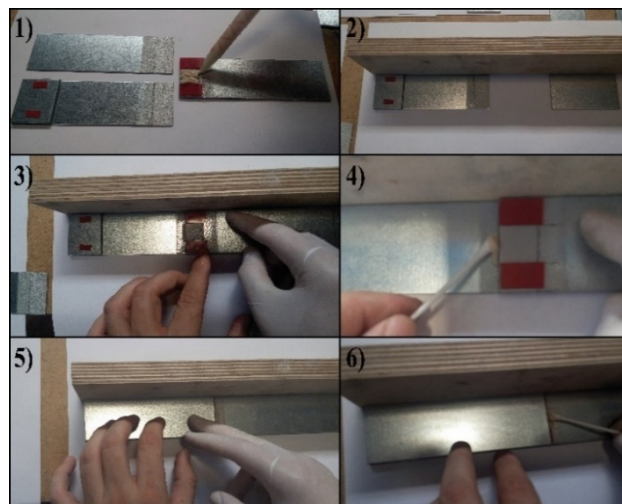
спајана на исти начин као и унутрашњи адхерент. Поступак израде узорка приказан је на слици 4.23.



Слика 4.21 Геометрија испитаног двоструког преклопног споја



Слика 4.22 Обезбеђење геометрије слоја адхезива



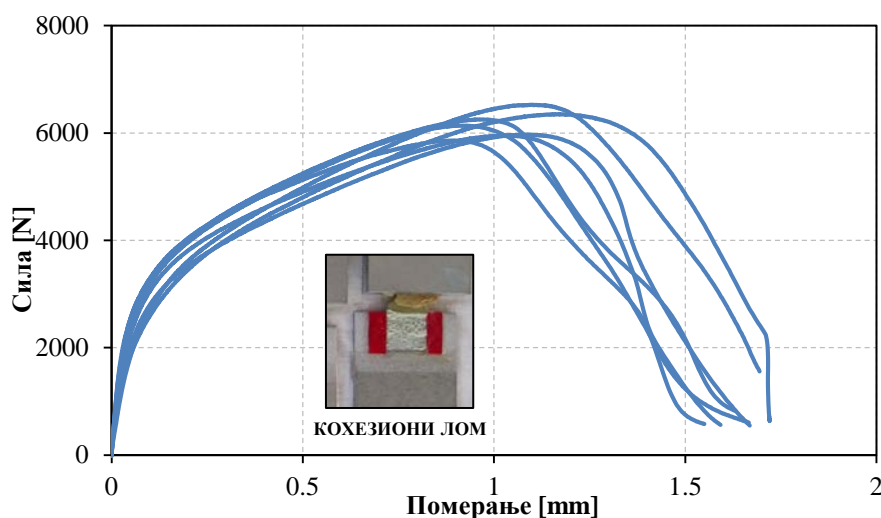
Слика 4.23 Припрема двоструких преклопних спојева

Испитивање узорка је спроведено помоћу универзалне кидалице Shimadzu Autograph. За мерење релативног померања унутрашњег у односу на спољашњи адхерент коришћен је контактни екстензометар типа MF-MF2(2 Ω) (слика 4.24), са распонем контактних тачака од 50mm и максималним померањем +2mm. Оптерећење

је наношено контролисаном деформацијом константне брзине 1,25mm/min. Испитивање је обављено у лабораторијским условима, при температури од $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ и релативној влажности ваздуха 40-50%. Испитано је 7 узорака, чији су дијаграми сила-померање приказани на слици 4.25. На свим испитаним узорцима регистрован је кохезиони механизам лома.



Слика 4.24 Диспозиција при испитивању двоструког преклопног споја под дејством статичког оптерећења

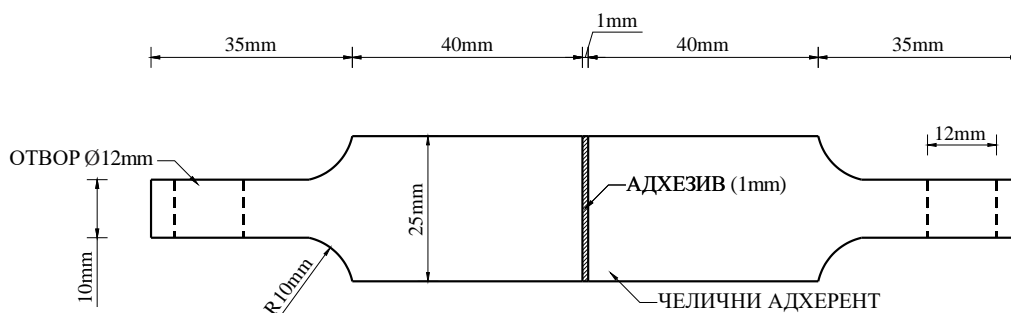


Слика 4.25 Дијаграм сила-померање – двоструки преклопни спој – Lord 410/GV

На основу резултата испитивања одређена је средња вредност чврстоће на смицање двоструких преклопних спојева, која износи 6,15kN (12,01MPa). Приказани дијаграми сила-померање су у поглављу 4.9 коришћени за одређивање дијаграма напон-деформација, односно механичких својстава адхезива.

4.7 Испитивање чеоних спојева оптерећених на затезање

Испитивање чеоних адхезионих спојева крутих адхерената је дефинисано стандардом СРПС ЕН 15870:2009 [81]. У прошлости се овај тип испитивања користио искључиво за одређивање њихове чврстоће на затезање адхезива. У новије време је показано да се резултати добијени таквим поступком испитивања могу успешно користити и за одређивање механичких својстава адхезива у области еластичности [82]. У овом истраживању испитивање је спроведено ради одређивања модула еластичности и Поасоновог коефицијента у комбинацији са резултатима добијеним испитивањем преклопних спојева. Испитани су спојеви адхерената кружног попречног пресека, пречника 25mm, чија је геометрија приказана на слици 4.26. Чеоне површине су припремљене поступком ПП1. Спајање је извршено помоћу адхезива Lord 410/GB. Дебљина слоја адхезива је постигнута употребом бакарне жице пречника 1mm. Да би се линеарност адхерената, дебљина слоја и сам адхезив одржали у адекватном стању, коришћен је уређај који је направљен посебно за ту намену (слика 4.27). Отицање адхезива из споја је обавијањем селотејп траке око самог споја. Испитивање је спроведено у режиму контролисане деформације, помоћу универзалне кидалице Shimadzu Autograph. Оптерећење је наносено померањем чељусту кидалице брзином од 1,5mm/min. Издужење адхезива је мерено контактним екстензометром MF-MF2(2Ω), као у случају преклопних спојева, с тим што је распон контактних тачака промењен са 50mm на 30mm. Ради елиминисања ексцентрицитета нанете силе и момента савијања у слоју адхезива, веза узорка и кидалице је постигнута помоћу специјалне конструкције (уређаја), приказане на слици 4.28. Испитано је 5 узорака, а резултати испитивања су приказани на слици 4.29. На свим узорцима је регистрован механизам специјалног кохезионог лома.



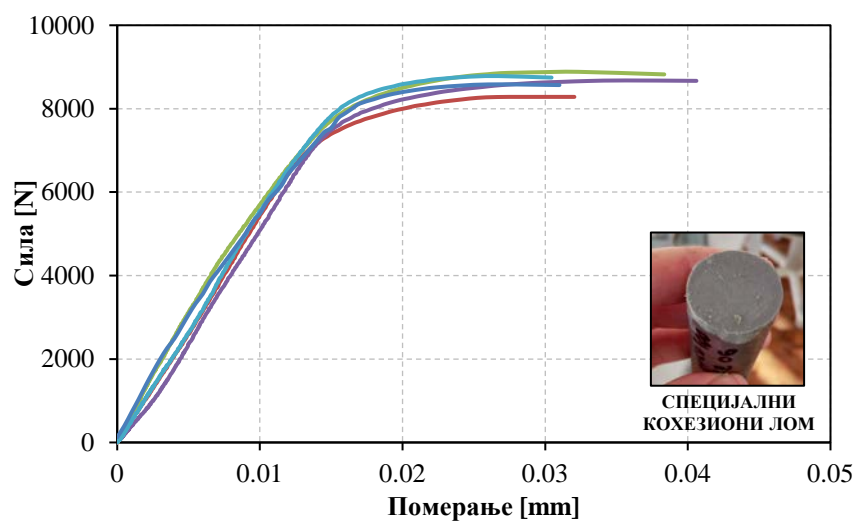
Слика 4.26 Геометрија чеоног споја



Слика 4.27 Уређај за монтирање адхезионих чеоних спојева



Слика 4.28 Диспозиција при испитивању узорка чеоног споја

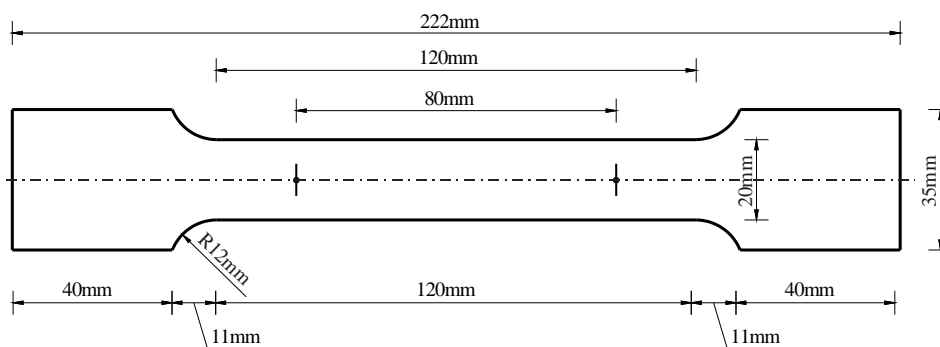


Слика 4.29 Дијаграм сила-померање – чеони спој – Lord 410/GV

Како је већ напоменуто, резултати испитивања чеоних спојева су, у комбинацији са резултатима испитивања двоструких преклопних спојева коришћени за одређивање механичких својстава адхезива. Међутим, да би се спровео поступак одређивања механичких својстава адхезива, најпре је било неопходно испитати механичка својства поцинкованог лима.

4.8 Испитивање поцинкованог лима и одређивање механичких својстава

Испитивање поцинкованог лима је спроведено према стандарду СРПС ЕН ИСО 6892-1:2012 [83]. Узорци дебљине 1mm, чија је геометрија приказана на слици 4.30, су израђени из исте серије табли која је коришћена за израду компонената фасадних и преклопних спојева. Испитивање је вршено у режиму контролисане деформације на универзалној кидалици Shimadzu Autograph, са брзином дилатације од $0,00025s^{-1}$ (одговарајуће брзина померања челоусти – 1,8mm/min). Ова брзина, према поменутом стандарду, спада у групу 2а и погодна је за одређивање границе попуштања челика. За мерење издужења узорка је коришћен контактни екстензометар MF-MF2(2 Ω), са распоном контактних тачака од 30mm. Недостатак употребе овог типа екстензометра је у томе што је њиме могуће мерити издужење до величине од 2mm, што је мање од максималне деформације узорака. Испитана је серија од 5 узорака (слика 4.31).



Слика 4.30 Геометрија узорка од поцинкованог лима.



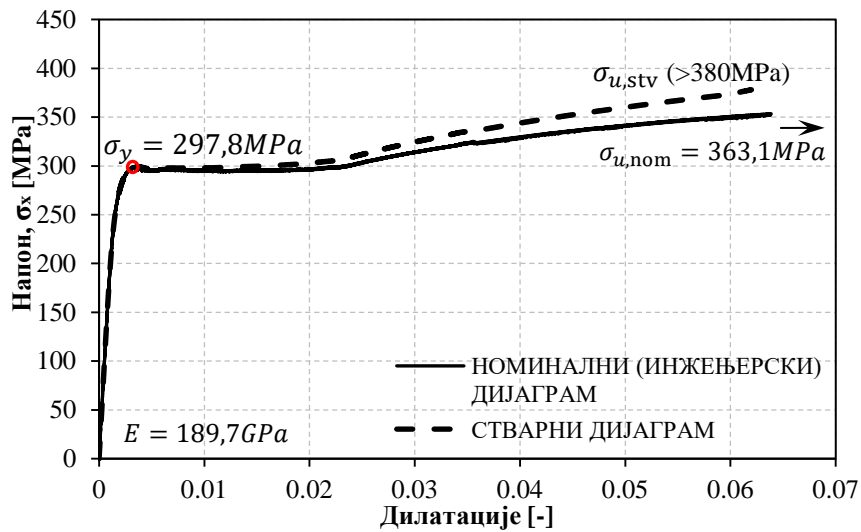
Слика 4.31 Диспозиција при испитивању епрувете поцинкованог лима

Ради спровођења нумеричке анализе спојева применом МКЕ, одређена су механичка својства челика: модул еластичности, граница попуштања и максимална чврстоћа. Најпре је, применом софтвера Findgraph [84], извршено осредњавање кривих напон-дилатација испитаних узорака. На основу осредњене криве, на којој су приказане номиналне (инжењерске) вредности напона и дилатација, σ и ε , срачунате су стварне вредности напона и дилатација, σ_t и ε_t , применом следећих једначина [56]:

$$\sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon) , \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon) . \quad (4.4)$$

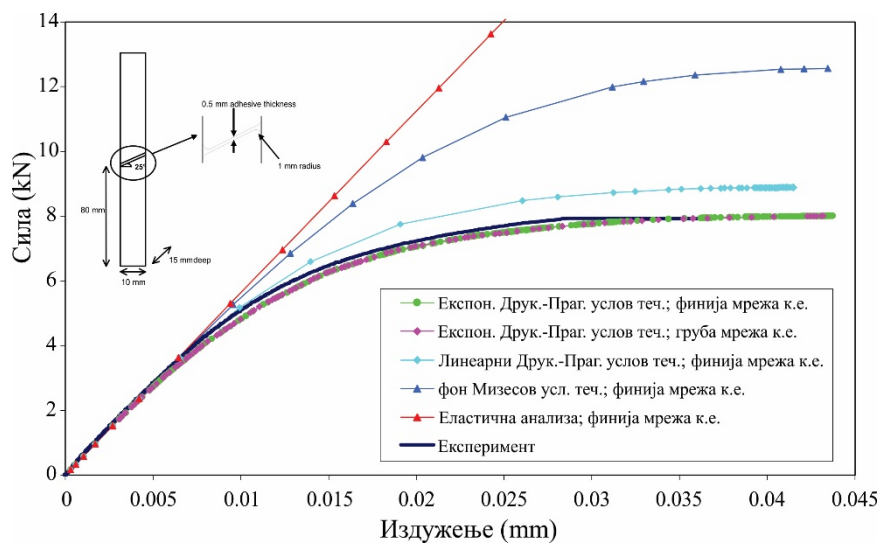
Номинални и стварни дијаграм напон-дилатација су приказани на слици 4.32. Модул еластичности је одређен као нагиб линеарног дела стварног дијаграма, а граница попуштања као први „пик“ напона након линеарног дела криве, означен црвеним кружићем. Максимална сила је регистрована након достизања максималног опсега мерења екстензометра. Имајући у виду да је за примену једначине (4.3) неопходно познавање одговарајуће дилатације, могуће је било одредити једино номиналну вредност максималног напона. Стварни максимални напон је већи од 380MPa, што представља највећу срачунату вредност при максималном померању главе екстензометра од 2mm.



Слика 4.32 Дијаграм напон-дилатација челика

4.9 Одређивање механичких својстава адхезива

За прорачун напонско-деформацијског стања адхезионих спојева, применом МКЕ, неопходно је дефинисати различите параметре материјала. Они зависе од врсте анализе која се спроводи, која у великој мери утиче тачност резултата. Утицај врсте анализе на поузданост резултата прорачуна је илустрован на слици 4.33 [56]. Да би се постигла одговарајућа поузданост прорачуна, веома је важно одредити што тачније вредности параметара материјала. Материјали се у могу моделирати као еластични, виско-еластични, еласто-пластични и др. У складу са тим се разликују и типови параметара које је неопходно одредити. С обзиром да многи од њих захтевају специјалне врсте експеримената, ова ставка најчешће спада у најкомпликованије.



Слика 4.33 Зависност резултата нумеричког прорачуна од типа анализе [56]



Ради одређивања механичких својстава адхезива Lord 410GB, на основу дијаграма сила-померање преклопних и чеоних спојева, приказаних на сликама 4.25 и 4.29, срачунати су дијаграми τ - γ , односно σ - ε .

У случају преклопних спојева, сила F се са спољашњих на унутрашњу плочу преноси преко 2 слоја адхезива, те се осредњени напон смицања у слоју адхезива може израчунати према:

$$\tau_{av} = \frac{F}{2 \times 16 \times 16} = \frac{F}{512 \text{ mm}^2}, \quad (4.5)$$

док се вредност клизања одређује према следећој једначини:

$$\gamma = \frac{\Delta d_{50}}{d_a} = \frac{\Delta d_{50}}{1 \text{ mm}}, \quad (4.6)$$

где је Δd_{50} издужење мерено екстензометром са распонем контактних тачака 50mm, а d_a дебљина слоја адхезива.

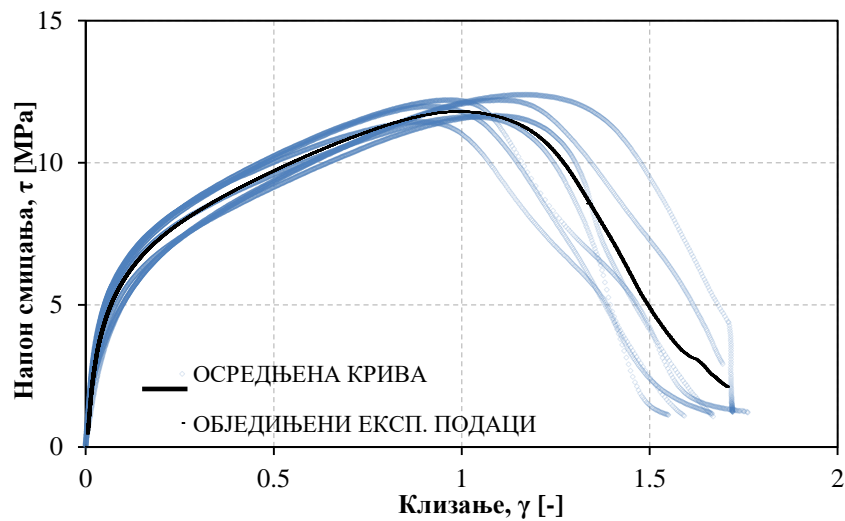
Због изузетно велике разлике у крутости између адхезива и адхерената, у случају чеоних спојева целокупно мерено издужење је приписано слоју адхезива. Напон и дилатација су срачунати помоћу следећих једначина:

$$\sigma = \frac{F}{\frac{25^2 \pi}{4}} = \frac{F}{490.87 \text{ mm}^2}, \quad (4.7)$$

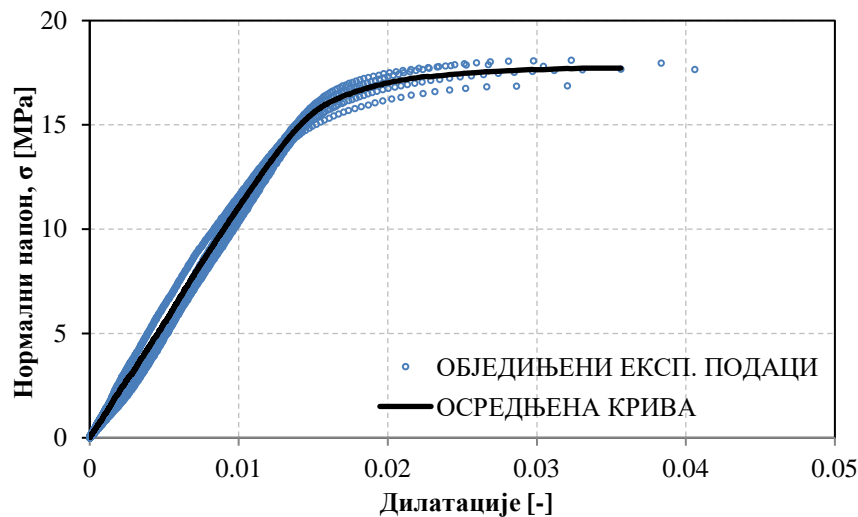
$$\varepsilon = \frac{\Delta d_{30}}{d_a} = \frac{\Delta d_{30}}{1 \text{ mm}}, \quad (4.8)$$

где је Δd_{30} издужење мерено екстензометром са распонем контактних тачака 30mm.

Добијени дијаграми су осредњени помоћу софтвера Findgraph и приказани на сликама 4.34 и 4.35.



Слика 4.34 Осредњена τ - γ крива, двоструки преклопни спој, Lord 410/GB



Слика 4.35 Осредњена σ - ε крива, чеони спој, Lord 410/GB

На основу резултата испитивања чеоних спојева могуће је одредити појавни модул еластичности E' (apparent E-modulus), који се знатно разликује од стварне вредности модула еластичности E . У еластичној области понашања адхезива важи однос [56]:

$$E' = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (4.9)$$

У [82] је зависност између модула смицања G и појавног модула еластичности E' дефинисана следећим изразом:

$$\nu \approx \frac{2G - E'}{2(G - E')}. \quad (4.10)$$

На основу осредњених кривих, приказаних на сликама 4.34 и 4.35, помоћу једначина (4.9) и (4.10) су одређене вредности модула смицања, појавног модула еластичности, Поасоновог коефицијента и модула еластичности адхезива Lord 410GB. Ове вредности су сумиране у табели 4.6.

Табела 4.6 Механичка својства адхезива Lord 410/GB

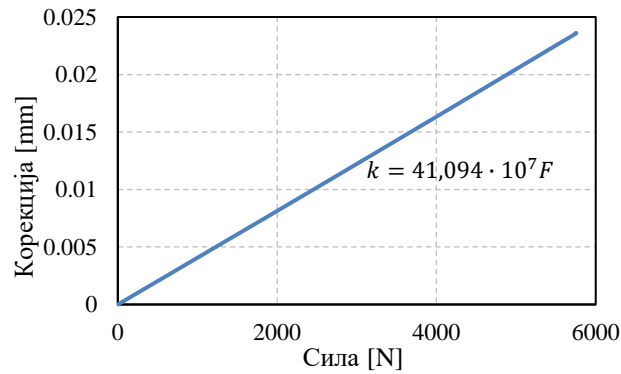
Параметар	Lord 410GB
E'	1102 МПа
G	172 МПа
ν	0,408
E	482 МПа

Параметри еласто-пластичног модела адхезива се могу одредити помоћу експерименталних резултата из испитивања затезањем монолитног узорка адхезива или испитивањем на смицање затезањем преклопних спојева [56]. Уколико се параметри одређују на основу резултата испитивања преклопних спојева најпре се одређују вредности σ - ε дијаграма помоћу следећих једначина:

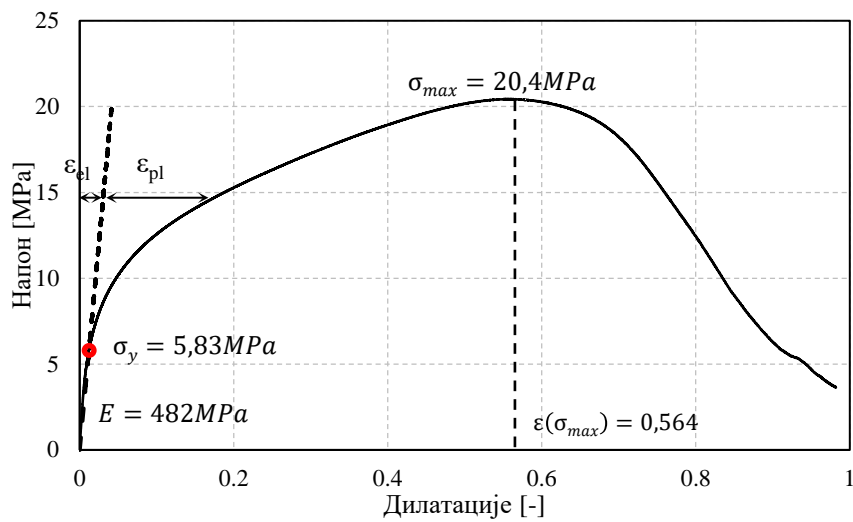
$$\sigma = \sqrt{3} \cdot \tau , \quad (4.11)$$

$$\varepsilon = \gamma / \sqrt{3} . \quad (4.12)$$

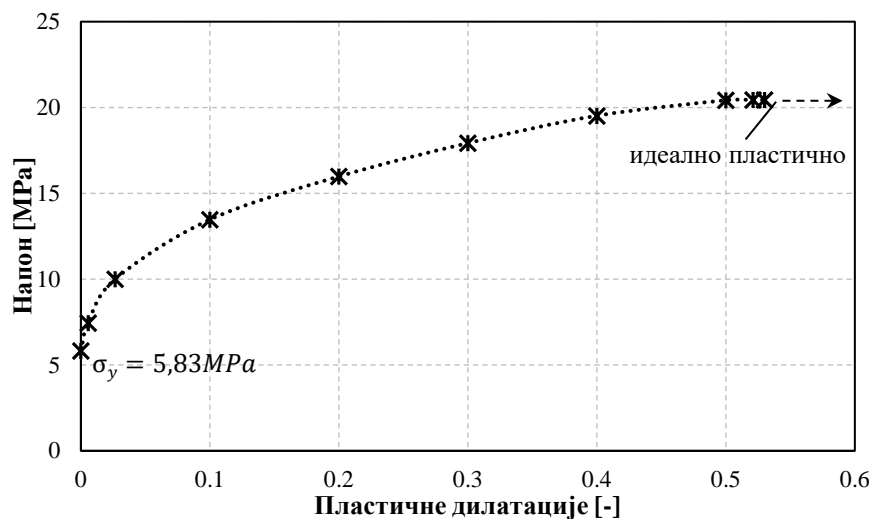
Применом једначина (4.11) и (4.12) срачунате су вредности σ - ε дијаграма. Имајући у виду да је у мереној деформацији адхезива урачуната и деформација адхерената између контактних тачака, извршена је корекција срачунатих вредности. Ради одређивања удела деформације адхерената у мереном издужењу, помоћу параметара материјала одређених из експерименталних резултата, у софтверском пакету ABAQUS је извршена прелиминарна анализа двоструког преклопног споја. Анализа је показала да су се, при деловању сила које доводе до лома узорака, напони у адхерентима налазили у зони еластичности. На основу резултата прелиминарног прорачуна извршене су корекције мерених деформација, чија је зависност од интензитета силе приказана на слици 4.36. Кориговани σ - ε дијаграм је приказан на слици 4.37. Треба напоменути да, иако је у одређеним истраживањима закључено да корекције дијаграма на основу резултата прорачуна МКЕ могу бити значајне [85], у овом случају је корекција првобитног σ - ε дијаграма била занемарљива.



Слика 4.36 Корекција деформације адхезива



Слика 4.37 Дијаграм напон-дилатација, Lord 410/GB



Слика 4.38 Зависност пластичне дилатације и напона

На основу коригованог дијаграма је одређена граница попуштања адхезива ($\sigma_y=5,83\text{MPa}$), изнад које се укупна дилатација састоји од две компоненте: еластичне

(ϵ_{el}) и пластичне (ϵ_{pl}) (слика 4.37). Дијаграм зависности пластичне дилатације и напона је приказан на слици 4.38. Овим подацима адхезив је дефинисан као мултилинеаран еластопластичан материјал са изотропним ојачањем и фон Мизесовим условом течења.

4.9 Нумеричко моделирање применом методе коначних елемената (МКЕ)

У претходним потпоглављима је приказан поступак одређивања параметара материјала, неопходних за нумеричко моделирање адхезионих спојева применом МКЕ. Вредности које су срачунате се односе искључиво на описивање нелинеарног понашања материјала. Међутим, ради обезбеђивања поузданости резултата прорачуна, у анализу је неопходно правилно укључити различите аспекте моделирања. Најзначајнији међу њима су:

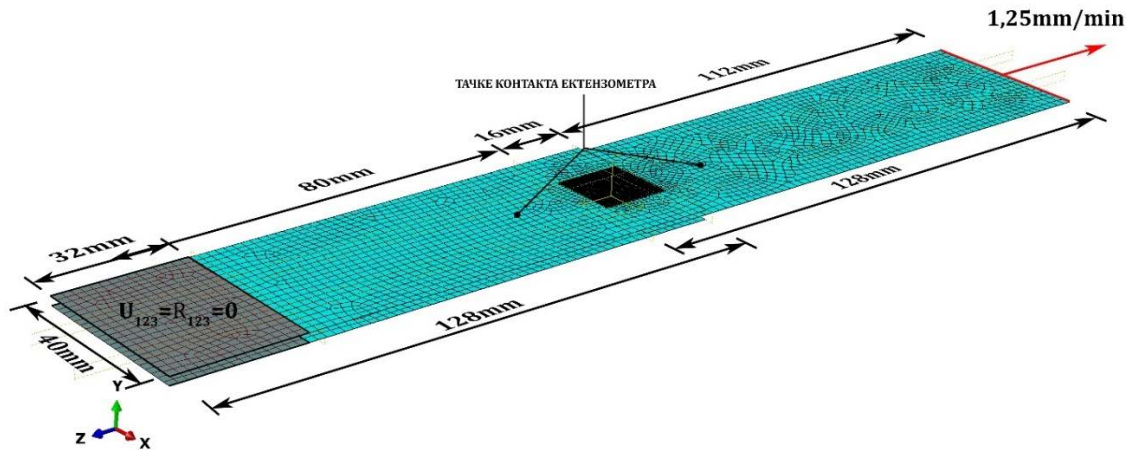
- моделирање геометрије,
- моделирање веза између елемената,
- одређивање граничних услова,
- моделирање услова експеримента (пре свега наношења оптерећења),
- избор врсте коначних елемената,
- избор мреже коначних елемената и
- правилна интерпретација добијених резултата.

У овом поглављу су приказани поступак и резултати нумеричког прорачуна напонско деформацијског стања преклопног и фасадног споја, уз поређење са одговарајућим експерименталним резултатима. За нумерички прорачун коришћен је софтверски пакет ABAQUS [86].

Моделирање двоструког преклопног споја

На слици 4.39 су приказани основни подаци о геометрији модела двоструког преклопног споја, граничним условима и мрежи коначних елемената. При изради модела је узета у обзир чињеница да се за анализу понашања адхезива најчешће захтева густа мрежа коначних елемената [58]. Због тога су, ради скраћења времена прорачуна, адхеренти моделирани површинским *2D shell* елементима (тип S4R), док су за моделирање адхезива употребљени *3D solid* елементи (тип C3D8R). Ивица најмањег

елемента адхерената је била 1mm, док су сви елементи адхезива били облика коцке, ивице 0,25mm. Тиме је постигнуто да се адхеренти моделирају са укупно 5443 коначних елемената, док су се слојеви адхезива састојали од 32768 елемената.



Слика 4.39 Модел двоструког преклопног споја у ABAQUS-у

Као што је већ напоменуто, у прелиминарној анализи је установљено да су, чак и у зонама највеће концентрације, напони у адхерентима далеко од границе течења. Из тог разлога, челик је у моделиран као линеарно еластичан материјал. За дефинисање понашања челика су коришћени параметри материјала који су приказани у табели 4.7. Адхезив је моделиран као еластопластичан материјал са изотропним ојачањем, са параметрима приказаним у табели 4.8.

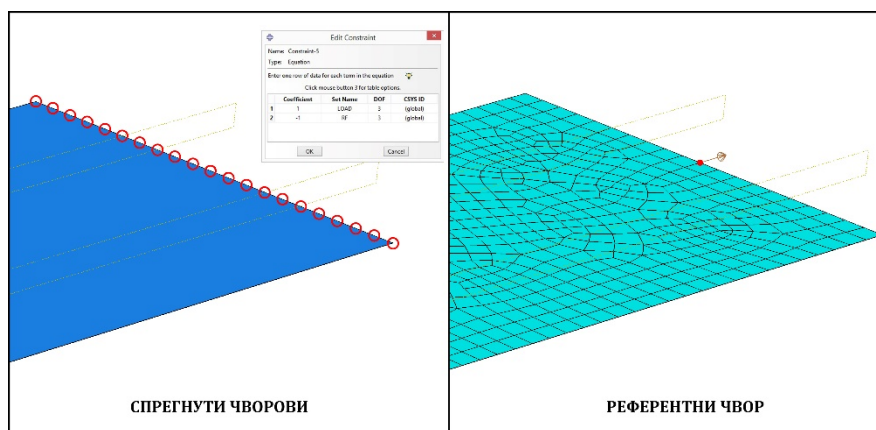
Табела 4.7 Параметри материјала - челик

Параметар	Адхеренти
E	189,7 GPa
v	0,3
ρ	7850 kg/m ³

Табела 4.8 Параметри материјала - адхезив

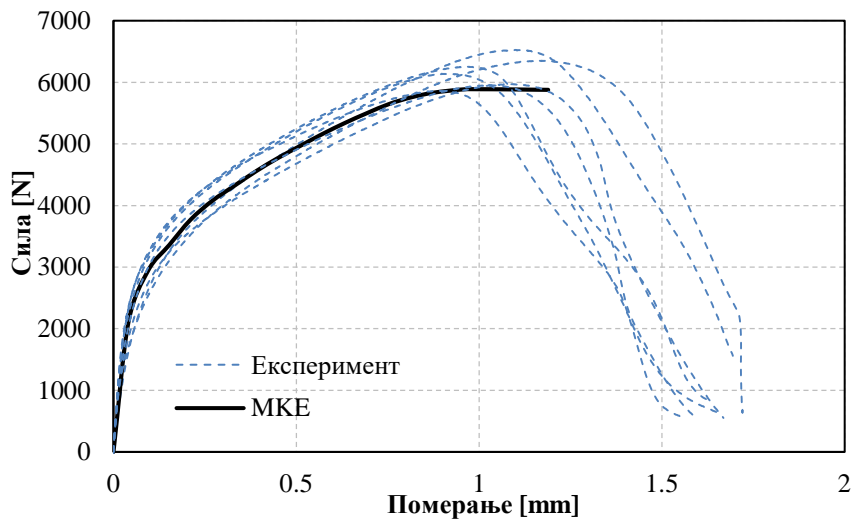
Параметар	Вредност	Дискретизована крива ојачања					
		Бр.	σ [MPa]	ε _{pl} * [-]	Бр.	σ [MPa]	ε _{pl} * [-]
E	482 MPa	1	5,828	0	6	17,927	0,3
v	0,408	2	7,451	0,0056	7	19,520	0,4
ρ	1125 kg/m ³	3	10	0,0265	8	20,421	0,5
*ε _{pl} – пластична дилатација		4	13,472	0,1	9	20,438	0,5212
		5	15,980	0,2	10	20,438	0,53

Спој адхезива и адхерента је моделиран као непопустљив, типом везе „*tie constrain*“ који дефинише контакт између „*master*“ и „*slave*“ површине. Овај тип је погодан за моделирање веза двеју површина са различитом мрежом коначних елемената, што је овде случај. Гранични услови су усвојени тако да су, у осенченој зони (слика 4.39), која представља део споја који је прихваћен чељустима кидалице, онемогућени померање и ротација у сва три правца (тип граничних услова - *encastre*). На супротном крају споја су, по ивици адхерента, задати гранични услови који подразумевају померање ивице у *Z* правцу брзином од 1,25mm у јединици времена (тип граничних услова - *velocity*). С обзиром да је трајање корака у коме је овај гранични услов дефинисан $t=1$, померање ивице на крају прорачуна износи 1,25mm. Да би било могуће одредити дијаграм сила-померање, пре дефинисања померања ивице адхерента, неопходно је било спрегнути све чворове коначних елемената посматране ивице са једним одабраним чвором (слика 4.40), коме је касније задат поменути гранични услов. Тиме је омогућено да се промена реакције ослоња у току времена прати помоћу реакције посматраног чвора. У супротном би, за сваки инкремент посебно, било неопходно спровести интеграцију сила по чворовима ивице адхерента, што је веома компликован поступак.

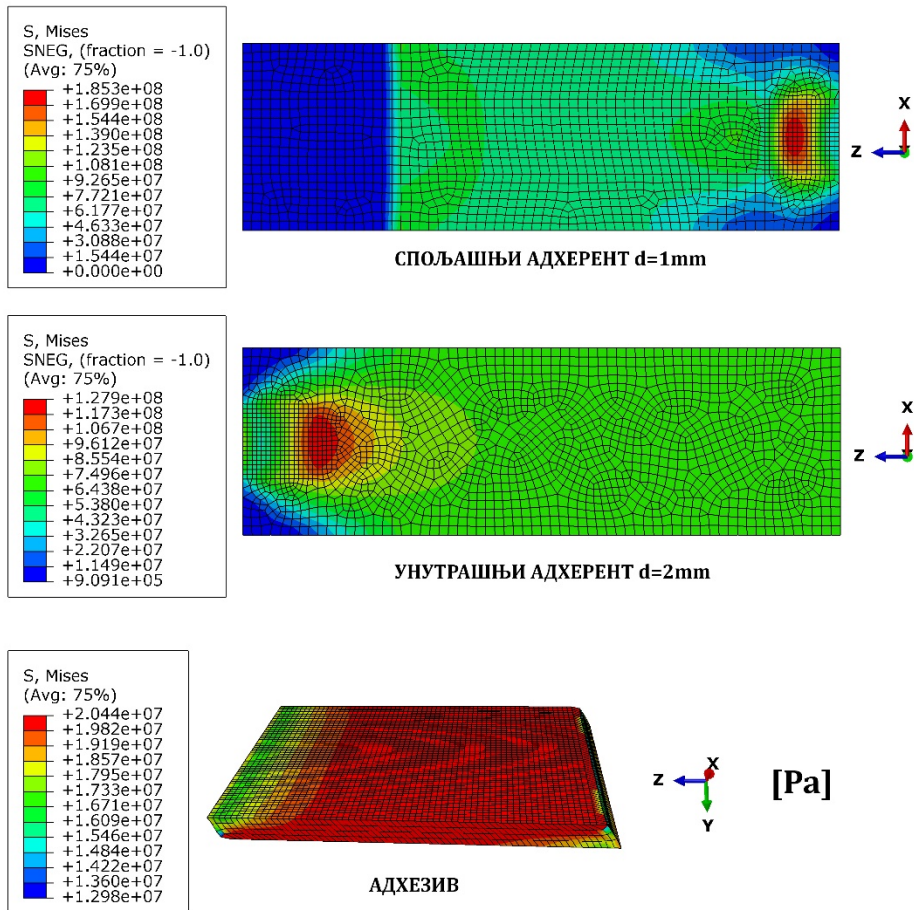


Слика 4.40 Спрезање чворова ивице адхерента

Тип анализе који је спроведен на креираном моделу је *general/static*. Да би се добио довољан број података за одређивање дијаграма, вредност максималне величине инкремента је ограничена на 0,05. Резултати прорачуна су оцењени на основу упоређивања дијаграма сила-померање са експерименталним подацима. При томе померање које је добијено нумеричким прорачуном представља разлику у померању тачака контакта екстензометра (слика 4.39).



Слика 4.41 Упоредње нумеричког са експерименталним дијаграмима сила-померање



Слика 4.42 Приказ фон Мизесових напона при максималној деформацији

Резултати нумеричког прорачуна, приказани пуном линијом на слици 4.41, су блиски вредностима добијеним експериментално. То показује да се применом поступка приказаног у претходним поглављима на адекватан начин могу одредити параметри

материјала. Међутим, одређивање опадајућег дела дијаграма сила померање захтева имплементацију критеријума лома адхезива у нумерички модел. Параметре који дефинишу критеријум лома није једноставно одредити, и за то је потребно спровести посебне поступке експерименталних испитивања. Више детаља о дефинисању критеријума лома се може наћи у [5].

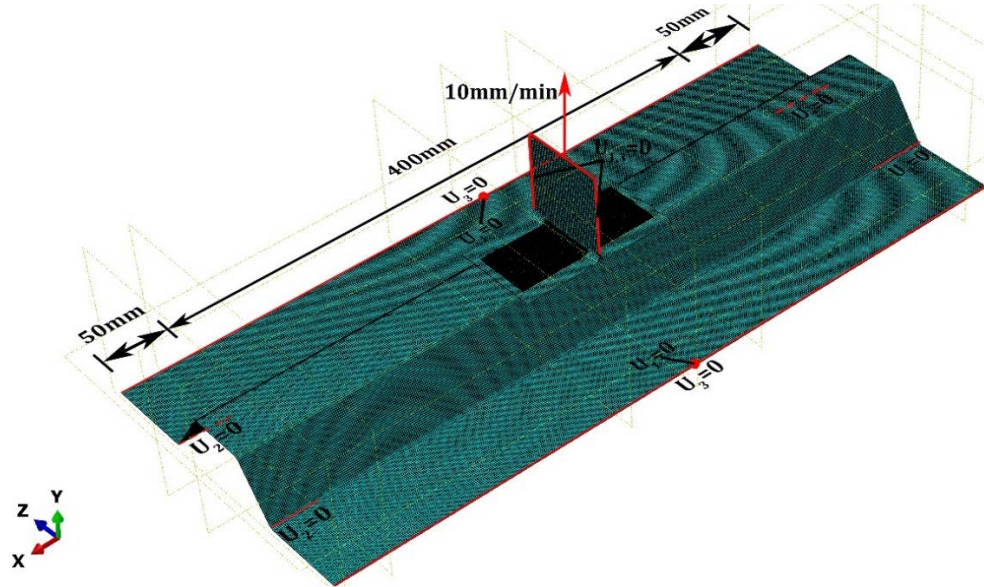
На слици 4.42 је приказан распоред фон Мизесових напона при померању ивице унутрашњег адхерента од 1,25mm. Како је већ напоменуто, напон у адхерентима се чак и у зонама максималне концентрације налази у области еластичности. Са друге стране, скоро цела запремина адхезива је „доживела“ пуну пластификацију.

Моделирање фасадног споја

Нумерички прорачун фасадног споја је спроведен у софтверском пакету ABAQUS. Адхезив је моделиран коришћењем истих параметара који су коришћени приликом анализе двоструког преклопног споја. Међутим, како је прелиминарни прорачун показао да, при дејству сила које су регистроване у експерименталном испитивању, напони у трапезастом лиму достижу вредности које су више од његове границе попуштања, челик је моделиран као идеално еласто-пластичан материјал. Дефинисан је истим параметрима као у случају двоструког преклопног споја и границом попуштања $\sigma_y=297,8\text{MPa}$.

Основни подаци о геометрији модела, граничним условима и мрежи коначних елемената су приказани на слици 4.43. Адхеренти су моделирани *2D shell* елементима типа S4R, при чему је ивица најмањег елемента била 1,2mm. Адхезив је моделиран *3D solid* елементима типа C3D8R, са димензијом ивице најситнијег елемента од 0,5mm. Модел се састојао од укупно 92871 S4R елемената адхерената и 79360 C3D8R елемената адхезива. На местима контакта U-профила и трапезастог лима, на дужини од 50mm дефинисани су гранични услови којима је онемогућено померање у правцу деловања силе („Y“ правац на слици 4.43). На контакту спољашњих ивица трапезастог лима и пода кидалице (слика 4.14) такође је ограничено померање у „Y“ правцу. Да би се спречила транслација модела у „X“ правцу, вертикалним ивицама ребра Т-профила и средишњим тачкама спољашње ивице трапезастог лима је онемогућено померање у овом правцу. Овако дефинисани гранични услови адекватно представљају услове експеримента. Спој адхезива и адхерената је дефинисан типом везе „*tie constrain*“. Оптерећење је задато као померања горње ивице Т-профила брзином од 11mm у

јединици времена (тип граничних услова - *velocity*). Ради одређивања односа интензитета силе и померања горње ивице Т-профила, њени чворови су спрегнути са референтним чвором који се налази на средини поменуте ивице.

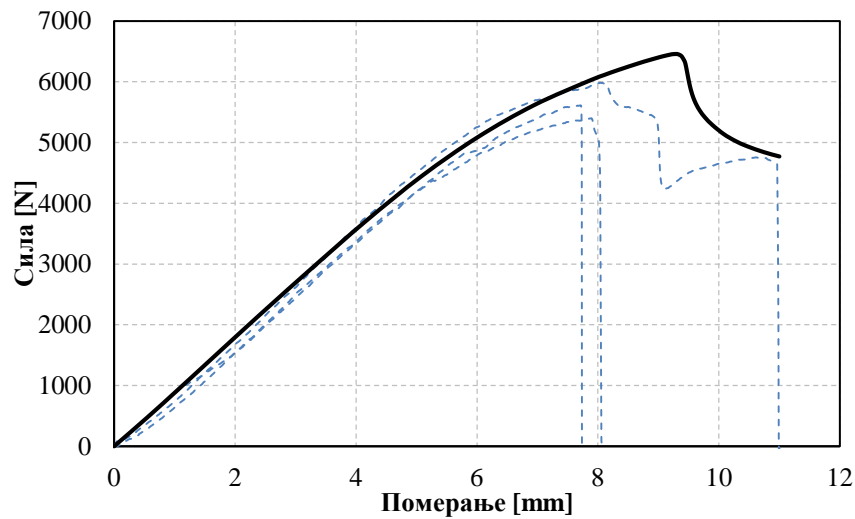


Слика 4.43 Модел фасадног споја у ABAQUS-у

Валидација резултата нумеричког прорачуна је обављена поређењем дијаграма сила-померање добијених нумеричким и експерименталним путем (слика 4.44). У ту сврху су коришћени резултати експерименталног испитивања некондиционираних узорака фасадног споја, израђених помоћу адхезива Lord 410 GB, са припремом површина адхерената поступком ПП2 (слика 4.16 лево). Поменути експериментални резултати су одабрани из следећих разлога:

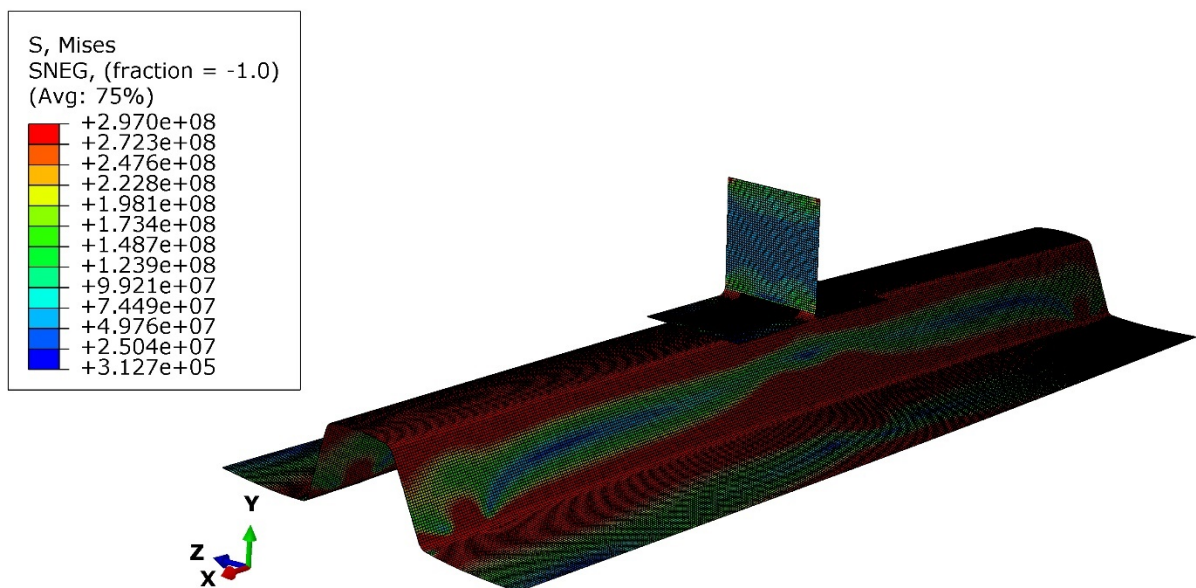
- Поменути узорци су „доживели“ кохезиовни лом, што је у нумеричком поступку дефинисано претпостављајући потпуну везу између адхезива и адхерената.
- У прорачуну су коришћени параметри материјала одређени испитивањем некондиционираних спојева израђених помоћу адхезива Lord 410 GB.

Резултати нумеричког прорачуна до вредности померања од 8mm показују веома задовољавајуће поклапање са експерименталним резултатима. Након тога нумерички прорачун предвиђа наставак раста силе, што се разликује од експерименталних резултата. Разлог за то лежи у чињеници да у моделу нису дефинисани критеријуми лома адхезива. Како је већ напоменуто, за одређивање ових критеријума неопходно је



Слика 4.44 Поређење дијаграма сила-померање добијених нумеричким и експерименталним путем

спровести додатно експериментално испитивање. Међутим, имајући у виду да је основни циљ нумеричког прорачуна био валидација параметара материјала добијених нестандартним експериментима и поступком приказаним у поглављу 4.9, може се закључити да је прорачун дао веома реалне резултате. То додатно потврђује и део криве на сегменту померања између 4mm и 8mm. На овом сегменту, као резултат пластификације адхезива, долази до појаве нелинеарности на дијаграму сила померање, што се поклапа са резултатима експеримента.



Слика 4.45 Приказ фон Мизесових напона при максималној деформацији



На слици 4.45 је приказан распоред фон Мизесових напона при померању горње ивице Т-профила од 11mm. Како је већ напоменуто, може се регистровати да су напони у трапезастом лиму достигли границу попуштања материјала, што оправдава употребу еластопластичног модела челика.

5 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ АНАЛИЗЕ АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА ПОД ДЕЈСТВОМ ЦИКЛИЧНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

У инжењерској пракси, већина типова конструкција и веза у конструкцијама су изложени оптерећењима променљивог карактера. Оно се често представља као циклично променљиво оптерећење које са одређеном учесталошћу делује на конструкцију. Услед дејства оваквог оптерећења долази до појаве замора материјала, односно конструкцијских елемената. У овом поглављу су приказане основе теорије замора, примењене на адхезионе спојеве. Поред тога, предложени су модели методе за описивање њиховог понашања под дејством цикличног оптерећења и предвиђање века трајања истих.

5.1 Основни принципи замора

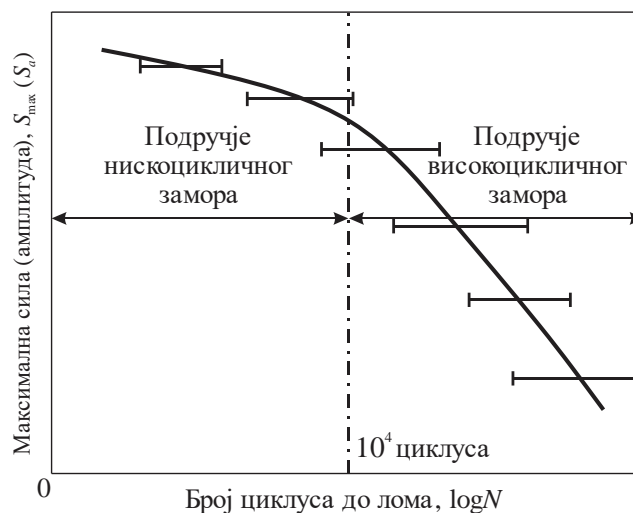
Замор материјала је појава постепеног разарања материјала конструкцијских елемената услед дуготрајног дејства променљивог оптерећења, које по свом интензитету уобичајено не доводи до прекорачења напона попуштања. Откази спојева услед замора, у великој мери се разликују од отказа који настају под дејством статичког оптерећења. До њих долази при мањим силама (некада и знатно мањим) у односу на отказе при статичком оптерећењу. Они се јављају након одређеног времена (броја циклуса) излагања конструкције цикличном оптерећењу. Такође, код замора полимерних материјала, у које спадају адхезиви, карактеристично је да не долази до веће трајне деформације пре самог отказа, тако да је веома тешко уочити оштећење приликом обављања инспекција, чак и непосредно пре самог отказа.

Процена века трајања конструкција (спојева), односно броја циклуса до лома при одређеном нивоу оптерећења је најчешће подељена на подручја:

- нискоцикличног (малоцикличног) замора;
- високоцикличног (многоцикличног) замора.

Разлика између ова два подручја је у томе што се код нискоцикличног анализира понашање елемената конструкција код којих је у значајној мери заступљено еластопластично стање напона, док је код високоцикличног доминантно еластично

стање напона (слика 5.1). Због ове чињенице су предвиђања века трајања елемената конструкција у ова два подручја у литератури позната и као приступи деформација-век (strain-life) и напон-век (stress-life). Иако се код метала под нискоцикличним замором најчешће подразумева замор код кога до лома долази након $\leq 10^4$ циклуса оптерећења, прецизно дефинисана граница између нискоцикличног и високоцикличног замора не постоји. Ово је још израженије у случају адхезионих спојева, нарочито због великог расипања експерименталних резултата при испитивању века трајања спојева услед дејства оптерећења замора. Тешкоће у раздвајању ова два подручја, веома су добро анализирани у уводном поглављу публикације [87]. Све анализе спроведене при изради ове дисертације се односе на високоциклични замор, премда су неки од испитаних спојева доживели лом при броју циклуса мањем од 10^4 .

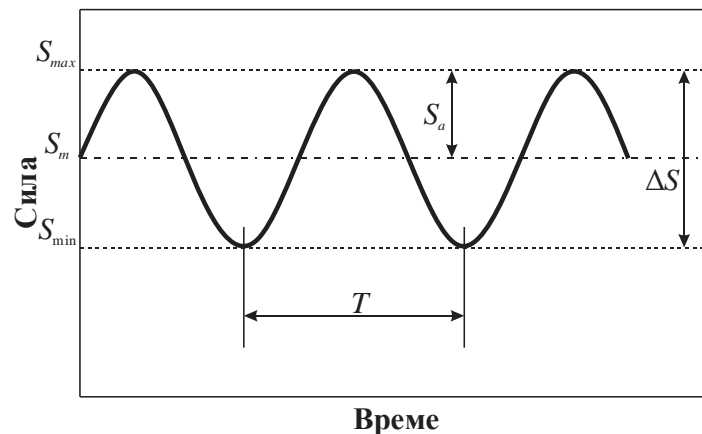


Слика 5.1 – Подручје нискоцикличног и високоцикличног замора

Код адхезионих спојева се као параметар за описивање замора, из разлога о којима ће више речи бити у одељку 5.2, најчешће уместо напона користи сила променљиве величине. Периодично променљиво оптерећење се по карактеру промене силе може поделити на константно циклично и променљиво циклично оптерећење. Константно циклично оптерећење најчешће представља синусоидном функцијом промене силе у току времена и карактеришу га константне вредности средње силе и амплитуде. Код променљивог оптерећења ове величине се мењају у току времена. Оно може бити представљено и као низ блокова константног цикличног оптерећења, који се најчешће назива *спектар оптерећења*.

5.2 Анализа замора при дејству оптерећења константне амплитуде

У експерименталним истраживањима константно циклично оптерећење је знатно заступљеније од променљивог. Главни разлог за то је чињеница да оно представља предуслов за различите врсте анализа замора. Поред тога, из оваквих истраживања се могу добити параметри који се користе за анализу конструкција при дејству променљивог цикличног оптерећења, док је обрнуто, углавном, немогуће. Основни појмови који описују константно циклично оптерећење, илустровани на слици 5.2, сумирани су у табели 5.1.



Слика 5.2 Константно циклично оптерећење

Табела 5.1 Основни појмови константног цикличног оптерећења

Максимална сила (напон)	S_{\max}
Минимална сила (напон)	S_{\min}
Амплитуда силе (напона)	$S_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2}$
Средња сила (напон)	$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2}$
Опсег сила (напона)	$\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$
Однос сила (степен асиметрије циклуса)	$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$
Период	T (sec)
Учесталост (фреквенција)	$\nu = \frac{1}{T}$ (Hz)

Оптерећење константног цикличног карактера може бити дефинисано уколико су позната три или више параметра. Оно је најчешће представљено синусоидном функцијом следећег облика:

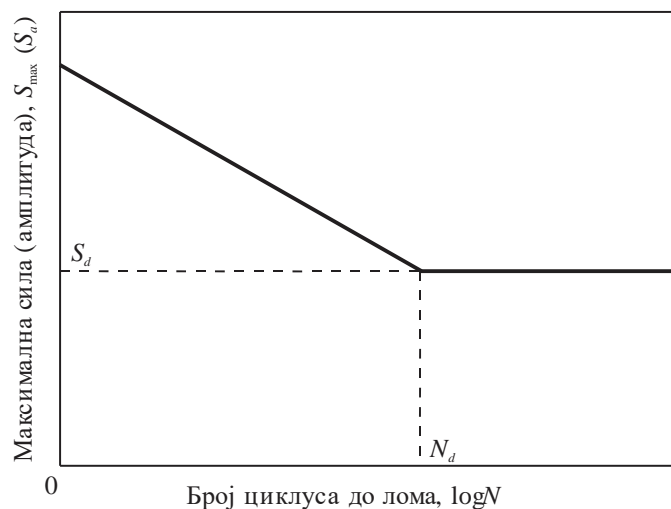
$$S = S_m + S_a \cdot \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

С обзиром да је $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$, за његово дефинисање су неопходни учесталост или период оптерећења и два параметра који се односе на интензитет оптерећења. У случајевима када се при експерименталном истраживању не испитује утицај учесталости оптерећења на понашање елемената под дејством цикличног оптерећења, што је био случај при изради ове дисертације, она се углавном узима као константна величина. При томе се води рачуна да њен избор обезбеди довољно брзо извођење експеримената, а да при томе не дође до значајног повећања температуре узорака, што може довести до промена њихових механичких карактеристика. Најчешћи парови вредности које се употребљавају за карактеризацију константног цикличног оптерећења при константној учесталости су средња сила (S_m) и амплитуда силе (S_a), односно максимална сила (S_{\max}) и степен асиметрије циклуса (R).

5.2.1 S-N (сила-век) приступ

Најчешће коришћено средство за предвиђање века трајања адхезионих спојева, као и конструкцијских елемената уопште, под дејством константног, али и променљивог цикличног оптерећења су S-N криве. Оне се добијају испитивањем одређеног броја узорака при различитим нивоима оптерећења, и константном вредношћу R и ν . Ниво оптерећења је најчешће дефинисан максималном силом или амплитудом силе. Узорци се испитују до лома, при чему се бележи број циклуса при ком се он догодио (век трајања). Уколико при одређеном нивоу оптерећења не долази до лома након унапред одређеног броја циклуса, максимална сила тог нивоа оптерећења се назива динамичка чврстоћа споја, S_d . У литератури је динамичка чврстоћа адхезионих најчешће дефинисана за узорке који преживе $2 \cdot 10^6$ циклуса. На слици 5.3 приказана је типична S-N крива.

Иако је у постојећим стандардима ASTM D3166-99 [88] и DIN EN ISO 9664 [89] препоручено коришћење максималних упросечених напона као параметра S-N криве, овакав приступ може довести до погрешних закључака. Још 70-тих година прошлог века су Oplinger [90] и Hart-Smith [36] показали да са носивост преклопних адхезионих спојева расте са порастом дужине преклопа до одређене границе, након које пораст дужине преклопа не доводи до пораста носивости. У том случају, са порастом дужине преклопа, упросечени напон би се смањивао а носивост остала иста. Са друге стране, код затезних спојева различитих геометрија долази до неунормне прерасподеле напона у равни управној на дејство силе. Ова прерасподела битно зависи од геометрије и крутости адхерената. Такође, постојање више различитих типова лома адхезионих спојева, односно недостатак јединственог критеријума лома применљивог на различите типове спојева [5] као и чињеница да не постоји јединствена веза између лако мерљивог просечног напона и максималног напона у споју [91] још неки су од аргумената који показују непрактичност употребе напона као параметра S-N кривих. Зато се код адхезионих спојева као параметар углавном употребљава максимална сила.



Слика 5.3 S-N крива

5.2.2 S-N модели за процену века трајања

Ови модели су у прошлости углавном били коришћени за предвиђање века трајања у подручју високоцикличног замора. Овај приступ средином XI века предложио је Велер (Wöhler), испитујући узроке честих ломова осовина железничких локомотива [92]. Зато, у литератури, S-N криве врло често називају и Велеровим дијаграмима.

Иако је век трајања зависна променљива S-N модела, експериментални подаци се по правилу приказују на графиконима који као апсцису имају век трајања (односно његов логаритам), док је на ординати приказана максимална сила или логаритам максималне силе, односно амплитуде. У зависности од карактеристика експерименталних резултата, крива зависности века трајања од максималне силе или амплитуде, при константној R вредности, може имати различите облике. Линеарна зависност логаритма века трајања и максималне силе може се описати следећом једначином:

$$\log N = a + bS \quad (5.2)$$

где је N век трајања (број циклуса до лома), S параметар оптерећења (максимална сила, или амплитуда), док су a и b параметри модела који се одређују фитовањем према експерименталним подацима, неком од метода о којима ће више речи бити у одељку 5.2.3.

Уколико добијени резултати показују линеарну зависност на графику логаритам века трајања – логаритам максималне силе, S-N крива може бити представљена следећом једначином.

$$\log N = a + b \log S, \quad (5.3)$$

или, написано у степеном (*power law*) облику:

$$N = cS^b, \quad (5.4)$$

где је $c = 10^a$. S-N модел, представљен једначином (5.4), познатији је под називом Баскинов модел (Basquin, [93]). Једначине (5.1-5.3) дају добре резултате за подручје високоцикличног, али су се релативно лоше показале у подручју нискоцикличног замора. Ради коришћења S-N дијаграма за предвиђање века трајања у оба подручја касније су уведени додатни параметри који служе за побољшање облика криве, односно њено прилагођавање експерименталним подацима. У ту сврху су коришћени различити параметри, па је у [94] предложен модел у коме је у једначину (5.4) уведена динамичка чврстоћа, S_d , односно параметар B којим се контролише област нискоцикличног замора и добијене следеће једначине:

$$S = cN^b + S_d, \quad (5.5)$$

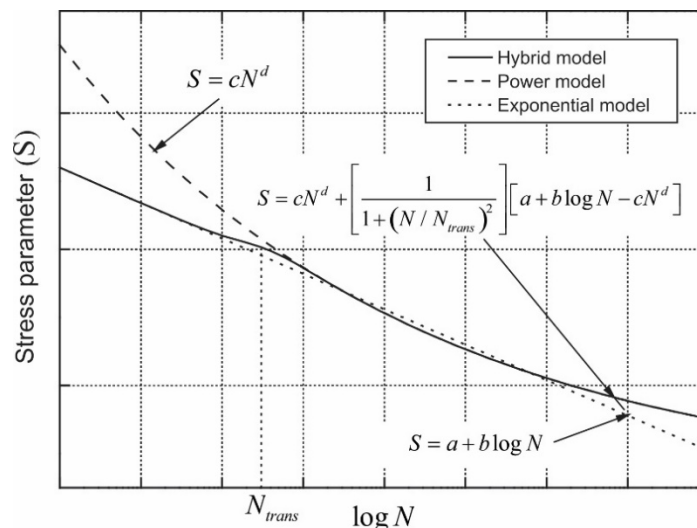
$$S = c(B + N)^b + S_d \quad (5.6)$$

Недостатак увођења динамичке чврстоће у S-N модел, представља чињеница да је за њено одређивање неопходно обавити више тестова код којих узорци не доживе лом или видљиво оштећење до унапред одређеног броја циклуса, што може захтевати велики утрошак времена и средстава. У литератури се тај број циклуса углавном креће у опсегу од 1 до 5 милиона циклуса.

Покушавајући да се побољша тачност модела при истраживању века трајања композита, Сарфараз [95] је развио хибридни модел који представља комбинацију модела описаних једначинама (5.2) и (5.4):

$$S = cN^d + \left[\frac{1}{1 + (N / N_{trans})^2} \right] [a + b \log N - cN^d], \quad (5.7)$$

где се параметри a, b, c и d добијају фитовањем криве према експерименталним подацима, док N_{trans} представља најмањи опажени век трајања из сета експерименталних података. Хибридни карактер криве илустрован је на слици 5.4, где се може уочити да до броја циклуса једнаког N_{trans} крива прати модел (5.2), а након тога прелази у облик који одговара једначини (5.4).



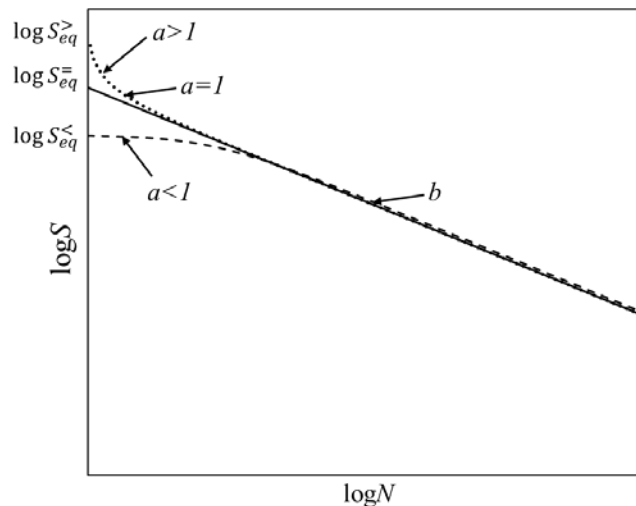
Слика 5.4 Хибридни S-N модел, према [95]

За разлику од модела представљених једначинама (5.1-5.7), чији се параметри могу регресионом анализом (методом најмањих квадрата) или неком другом

једноставном методом добити директно из експерименталних података, Сендецкиј (Sendeckyj) је у [96] развио модел чији се параметри добијају посебним поступком и који предвиђање века трајања заснива на моделу деградације чврстоће. S-N крива је представљена следећом једначином:

$$S_{\max} = \frac{1}{S_u} (1 - a + aN)^{-b}, \quad (5.8)$$

где је S_u статичка чврстоћа, а a и b параметри који се добијају поступком предложеним од стране Сендецкија [96]. Они представљају нагиб линеарног дела, параметар облика почетног дела криве и пресечну тачку са Y осом, односно силу при којој лом настаје након једног циклуса оптерећења на $\log N$ - $\log S$ дијаграму (слика 5.5).



Слика 5.5 Сендецијкев S-N модел, према [96]

5.2.3 Методе одређивања параметара S-N модела

За адхезионе спојеве је карактеристично да они показују веома велико расипање опажених резултата при испитивању њиховог века трајања. С обзиром на пробабилистички карактер експерименталних података и уобичајену ограниченост броја испитаних узорка, веома је важно овладати различитим техникама и методама одређивања параметара S-N модела да би се добиле криве са одређеном статистичком значајношћу. Ове методе се по правилу заснивају на некој од детерминистичких једначина, али подразумевају да се величине које у њима фигуришу, као што су век трајања или еквивалентна статичка чврстоћа (у случају модела Сендецкија) могу представити одређеним статистичким расподелама. Оне се у највећем броју случајева

представљају нормалном или двопараметарском Вејбуловом (Weibull) расподелом. У циљу повећавања експерименталног узорка, уз одређене претпоставке, за одређивање параметара модела могу се користити и подаци који нису добијени испитивањем узорака до лома цикличним оптерећењем. За одређивање параметара се могу користити следећи подаци:

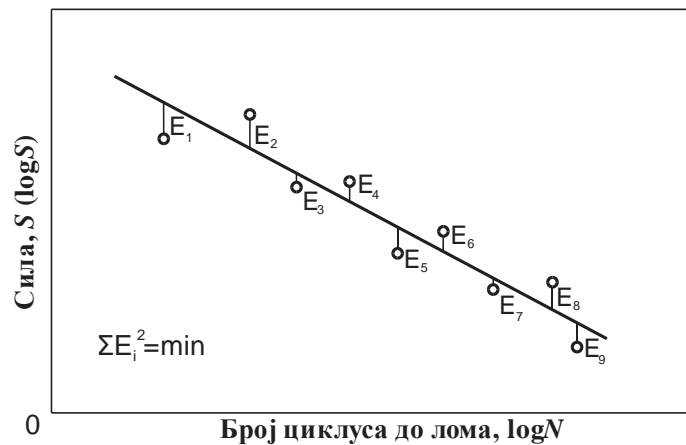
- 1) Подаци о чврстоћама узорака испитаних под дејством статичког оптерећења. При томе се уводи претпоставка да је узорак „доживео“ лом након једног циклуса оптерећења;
- 2) Подаци о броју циклуса при коме је узорак „доживео“ лом и максималној сили цикличног оптерећења којим је деловано на узорак;
- 3) Подаци о узорцима који нису „доживели“ лом до одређеног броја циклуса или у чијем случају је експеримент из неког другог разлога прекинут (лом неког од адхерената, нестанак струје и др.). У овом случају постоје две различите групе података:
 - а) Подаци о максималној сили и броју циклуса којем је узорак био изложен, при чему није дошло до лома.
 - б) Друга група, поред поменутих података, садржи и статичку чврстоћу добијену статичким испитањем поменутог узорка након дејства цикличног оптерећења, тзв. преосталу чврстоћу.

Треба напоменути да је употреба статичких чврстоћа при одређивању параметара оспоравана од стране неких аутора [97]. Заправо, њихова употреба може довести до нетачних вредности нагиба кривих у подручју високоцикличног замора, поготово ако су подаци добијени испитивањем са знатно нижим брзинама наношења силе или деформације. Са друге стране, њихово искључивање може довести до одређених грешака у предвиђању у подручју нискоцикличног замора [95].

У литератури, за одређивање параметара S-N кривих доминантно су заступљене три методе: регресиона анализа, метода максималне веродостојности и Сендецкијева метода деградације чврстоће.

Најчешће коришћен приступ одређивању параметара криве у оквиру регресионе анализе је *метода најмањих квадрата*. Принцип функционисања ове методе је

илустрован на слици 5.6. За претпостављене параметре неког од модела, крива добија одређени облик. Као мера одступања одабраног емпиријског модела од експерименталних података узима се сума квадрата одступања експерименталних од прорачунских података (енгл. sum of squared errors SSE). Оптималне вредности параметара модела су оне за које SSE има минималну вредност. У [98] је приказан поступак за директно одређивање параметара S-N модела (5.2) који дају минималну вредност SSE. Осим директним путем, одређивање параметара се може извршити коришћењем solver палете у MS Office Excel-у или неком математичком софтверу (Matlab и сл.). Употребом ове методе се могу узети у обзир групе података 1 и 2, а век трајања, статичка и динамичка чврстоћа се представљају нормалном расподелом.



Слика 5.6 Принцип методе најмањих квадрата

За разлику од методе најмањих квадрата, применом методе максималне веродостојности у анализу се могу укључити подаци о „преживелим“ узорцима (група 3а). Ова метода се заснива на одређивању вредности функције веродостојности $L(\theta)$ (likelihood) за различите сетове параметара модела. Оптималан избор за конструисање S-N криве представља скуп параметара модела који дају највећу вредност функције $L(\theta)$. Највећи недостатак ове методе је неопходност врло сложених поступака израчунавања. Ради поједностављења прорачуна, уместо вероватноће реализације узорка, p_i , најчешће се користи логаритам вероватноће, $\log p_i$.

Полазећи од претпоставке линеарне зависности логаритма силе и логаритма века трајања (једначине (5.3) и (5.4), вероватноћа одређеног податка се може срачунати у функцији променљиве t , која је дата изразом

$$t = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (5.9)$$

где су μ и σ претпостављена средња вредност и стандардна девијација скупа посматраних вредности $x = \log N$ или $\log S$. За претпостављене параметре S-N модела, ове вредности је једноставно одредити. Највероватнији скуп параметара модела је онај који максимизује функцију веродостојности која представља збир логаритама вероватноће сваког експерименталног узорка:

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^n L(\theta)_i = \sum_{i=1}^n \log(p_i), \quad (5.10)$$

где су $L(\theta)$ укупна веродостојност одабране групе параметара θ , $L(\theta)_i$ удео веродостојности сваког експерименталног податка, а $n = n_f + n_r$ број података који је једнак збиру бројева поломљених и преживелих узорака, респективно.

Доприноси веродостојности поломљених и преживелих узорака се разликују по томе што се код првих посматра функција густине вероватноће (PDF – Probability Density Function), једначина (5.11), а код других кумулативна расподела вероватноће (CDF – Cumulative Distribution Function), једначина (5.12). Употреба кумулативне расподеле вероватноће реализације преживелих узорака је оправдана чињеницом да је у њиховом случају познато да је број циклуса до лома сигурно већи од броја циклуса коме је узорак био изложен, за шта се вероватноћа изражава оваквим топом функције:

$$p(\text{polomljen}) = (2\pi)^{0.5} \cdot \exp(-t^2 / 2) dt \quad (5.11)$$

$$p(\text{preživeo}) = \int_t^{\infty} (2\pi)^{0.5} \cdot \exp(-u^2 / 2) du \quad (5.12)$$

Доприноси веродостојности, из једначина (5.11) и (5.12), дати су следећим изразима:

$$L(\theta)_i(\text{polomljen}) = -t^2 / 2 - \log \sigma \quad (5.13)$$

$$L(\theta)_i(\text{preživeo}) = \log_e \left[\int_t^{\infty} (2\pi)^{0.5} \cdot \exp(-u^2 / 2) du \right] \quad (5.14)$$

Метода Сендецкија се од претходне две методе разликује по два основа:

- 1) Њоме се уводи претпоставка да се статичка и динамичка чврстоћа, као и век трајања могу представити дво-параметарском Вејбуловом расподелом
- 2) Параметри модела се не одређују директно из експерименталних података, већ се квантитативно оцењују на основу скупа еквивалентних статичких чврстоћа, срачунатих из експерименталних података. При томе се у прорачун еквивалентне статичке чврстоће уводи тзв. „SLERA“ принцип (stress level equal rank assumption), којим се претпоставља да је век трајања појединачног узорка пропорционалан његовој статичкој чврстоћи.

Као што је већ поменуто, ова метода је заснована на принципу деградације чврстоће, који је Сендецкиј приказао једначином:

$$S_R = S_{\max} \left[\left(\frac{S_{ekv}}{S_{\max}} \right)^{\frac{1}{b}} - a(n-1) \right]^{-b}, \quad (5.15)$$

где је S_R преостала чврстоћа узорка након n циклуса оптерећења, S_{\max} максимална сила, S_{ekv} еквивалентна чврстоћа, а a и b су параметри модела. До лома долази када је $S_R = S_{\max}$, односно $n = N$. Према SLERA принципу, веку трајања и нивоу оптерећења сваког узорка одговара јединствена вредност еквивалентне чврстоће, коју је Сендецкиј изразио једначином.:

$$S_{ekv} = S_{\max} [1 - a + aN]^{-b}. \quad (5.16)$$

Помоћу произвољно одабраних параметара a и b могуће је одредити еквивалентну чврстоћу сваког поломљеног узорка. За тако добијени скуп еквивалентних чврстоћа могуће је одредити параметар облика и параметар скалирања Вејбулове расподеле. Параметри a и b , којима одговара највећа вредност параметра облика Вејбулове расподеле еквивалентних чврстоћа, представљају реалне параметре Сендецкијевог модела. При томе је статичка чврстоћа једнака одговарајућем параметру скалирања.

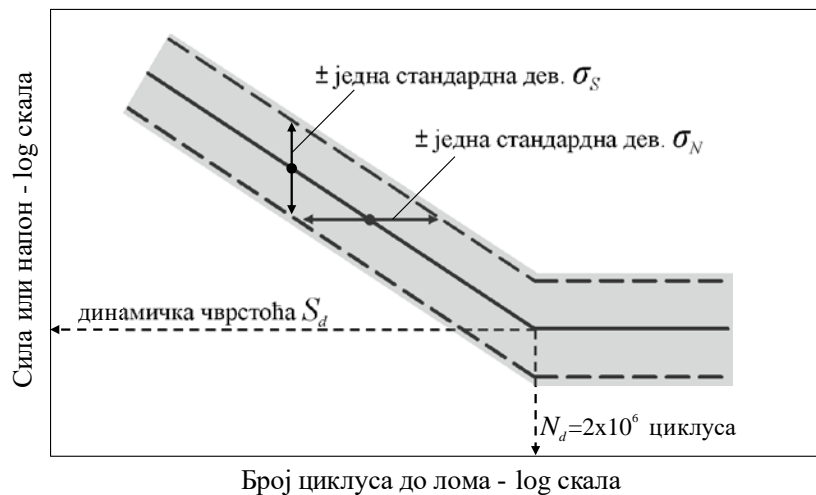
5.2.4 Развој алгоритама за одређивање параметара S-N модела

За конструисање S-N криве применом методе максималне веродостојности најпре се мора одабрати модел којим ће бити изражена зависност између нивоа оптерећења и броја циклуса до лома. У овој дисертацији је употребљен модел који представља

линеарну зависност између логаритма силе и логаритма века трајања узорка, у литератури најчешће приказан једначинама (5.3) и (5.4). Једноставним математичким трансформацијама ове једнакости се могу написати у следећем облику:

$$N = N_d (S / S_d)^k, \quad (5.17)$$

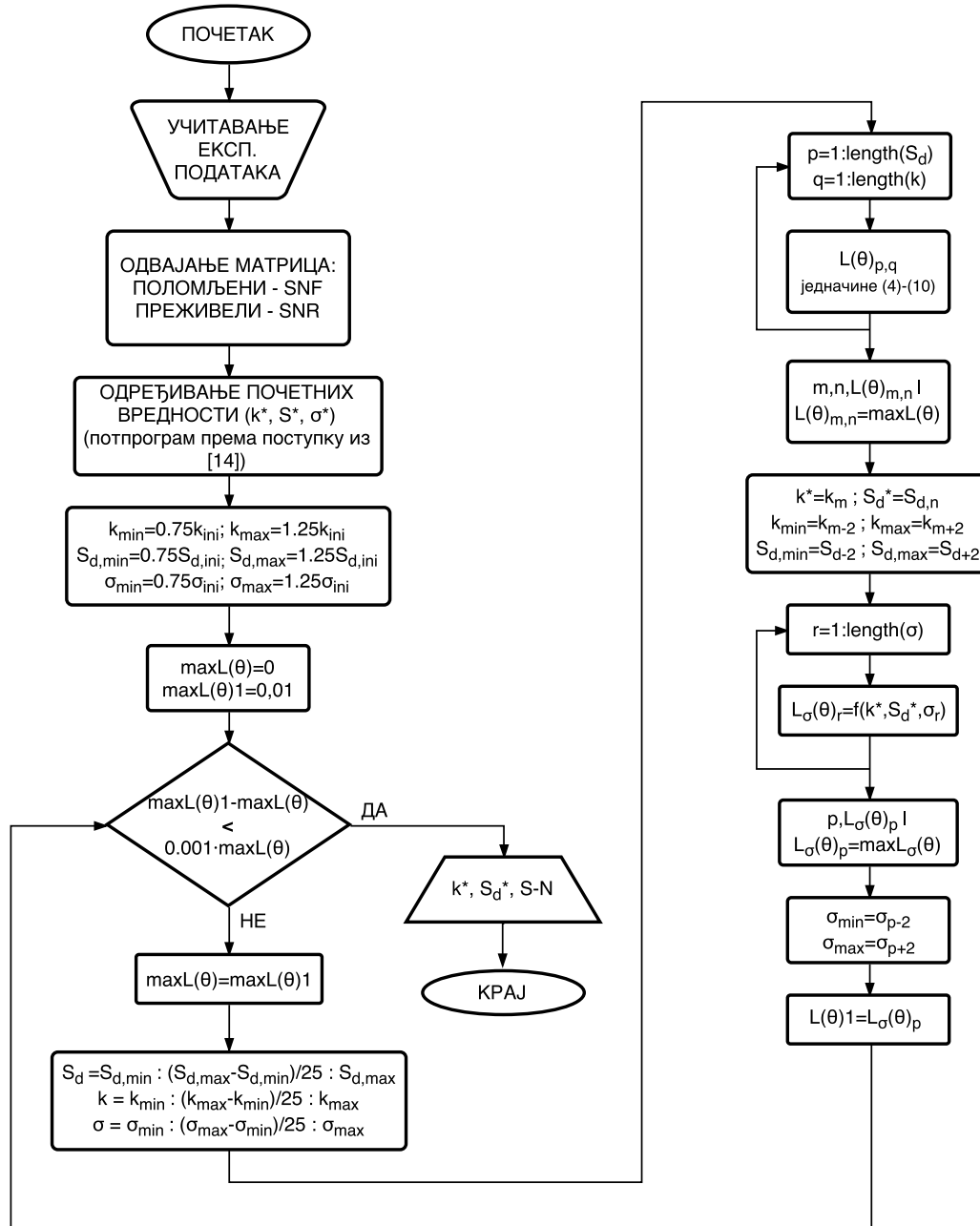
где је k нагиб S-N криве а S_d динамичка чврстоћа, која је дефинисана као сила при којој не долази до лома до унапред одређеног броја циклуса (N_d), који је у овом случају једнак $2 \cdot 10^6$. Тако, уколико узорак не доживи лом након излагања 2 милиона циклуса, његов век трајања се сматра бесконачним. Величине које фигуришу у једначини (5.17) илустроване су на слици 5.7.



Слика 5.7 Типична S-N крива описана једначином (5.19)

Након избора једнакости, врши се избор почетних вредности параметара модела, k и S_d , као и стандардне девијације σ . Премда је у [99] дата препорука за начин усвајања почетних параметара, они се у овде усвајају као параметри S-N модела добијени регресионом анализом, методом најмањих квадрата, за чије су срачунавање коришћени само подаци о поломљеним узорцима. За њихово срачунавање је написан посебан потпрограм, према поступку описаном у [98]. Користећи претпостављене параметре модела, срачунава се век трајања за сваки ниво оптерећења за који постоје експериментални подаци. Срачунате вредности представљају средње вредности (μ_i) века трајања за посматрани ниво оптерећења. Применом једначина ((5.9)–(5.14), (5.17)), претпостављене вредности σ и срачунатих средњих вредности μ_i , једноставно је одредити вредност функције веродостојности $L(\theta)$. Она се срачунава за

читав низ параметара k и S_d , који се налазе у интервалима између унапред дефинисаних минималних и максималних вредности. У алгоритму који је развијен у овој дисертацији границе интервала су одређене на $\pm 25\%$ у односу на почетне вредности.



Слика 5.8 Упростијени алгоритам програма за одређивање параметара S-N криве методом максималне веродостојности, написаног у MATLAB-у

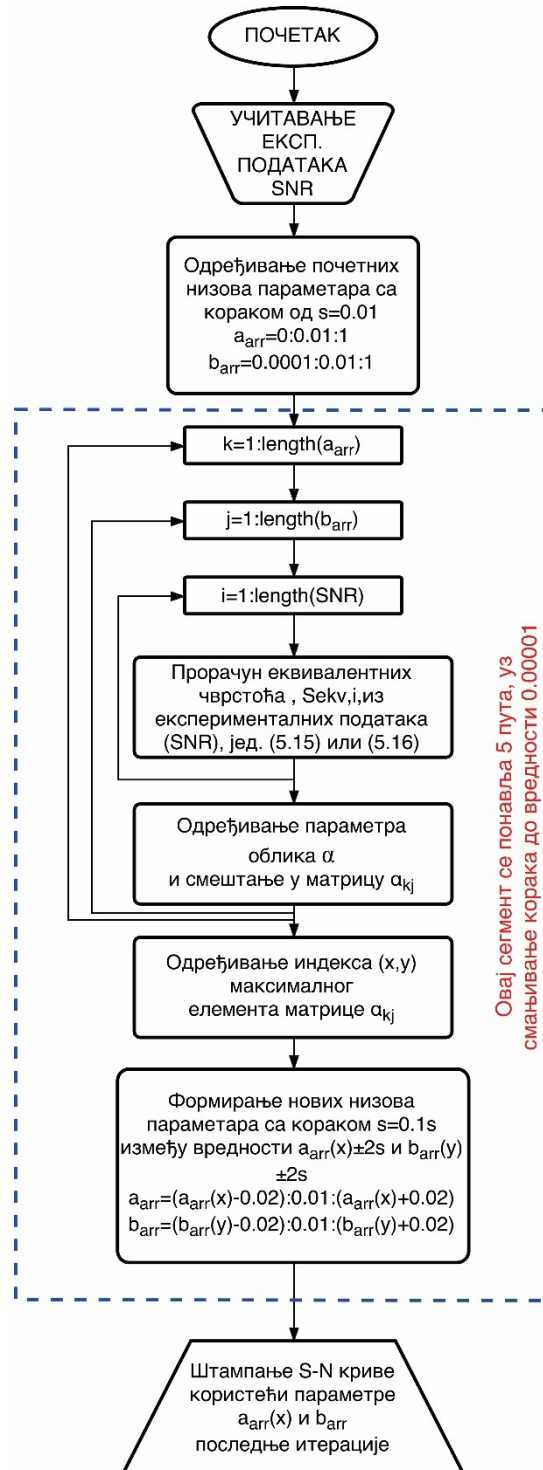
Након формирања низова параметара, одређује се онај пар који резултује највећом вредношћу функције веродостојности $L(\theta)$. За тако одабране параметре срачунавају се вредности $L(\theta)$ које одговарају низу вредности σ , генерисаном по

истом принципу као и у случају k и S_d . Из овог скупа вредности функције веродостојности се такође одређује максимум, као и одговарајућа вредност σ . Овако добијене вредности параметара модела и стандардне девијације представљају коначне вредности прве итерације.

Итерације се понављају тако што се у свакој следећој врши згушњавање параметара k и S_d . При томе се границе интервала у коме се налазе низови параметара модела не налазе на $\pm 25\%$ у односу на параметре одређене у претходној итерацији, већ оне представљају вредности претходних низова које су се налазиле на ± 2 места у односу на вредности које су дале максималну веродостојност. Итеративни поступак се прекида када разлика коначних вредности $L(\theta)$ две узастопне итерације буде мања од унапред постављеног критеријума. У овом случају то је $0,001 \cdot L(\theta)_{p-1}$ (p - број последње итерације). Алгоритам описаног поступка одређивања параметара S-N криве приказан је на слици 5.8.

Поступак који је Сендецкиј [96] предложио за одређивање параметара S-N модела, представљеног једначином (5.8), састоји се из следећих корака:

- 1) Одређивање почетних вредности параметара a и b . При томе се ове вредности могу усвојити на основу искуства, или помоћу израза предложених у [96].
- 2) Прорачун еквивалентних чврстоћа за сваки експериментални податак. При томе се могу користити подаци о веку трајања (максимална сила и век трајања) и преосталој чврстоћи (максимална сила, број циклуса оптерећења и преостала чврстоћа). У првом случају се употребљава једначина (5.16), док се у другом еквивалентна чврстоћа рачуна помоћу једначине (5.15).
- 3) Одређивање параметра облика и параметра скалирања Вејбулове расподеле добијеног скупа еквивалентних чврстоћа.
- 4) Промена вредности параметра a и b применом неког усвојеног критеријума, понављање корака 2-4 и одређивање пара коме одговара максимална вредност параметра облика. У [96] је предложио да се у ту сврху користе методе имплицитног диференцирања.



Слика 5.9 Упростијени алгоритам програма за одређивање параметара S-N криве методом Сендецкија, написаног у Matlab-у

За разлику од Сендецкијевог приступа, алгоритам који је развијен у овој дисертацији и приказан на слици 5.9 подразумева другачији поступак промене вредности претпостављених параметара (корак 4). Предложени алгоритам се заснива на чињеници да су у већини случајева a и b мањи од 1 [100], као и да је њихова

задовољавајућа тачност реда величине 10^{-4} . До вредности ових параметара се долази применом 5 итерација. У првој итерацији се креирају низови вредности параметара $a=0\div 1$ и $b=0\div 1$, са кораком 0,1, и одреди комбинација чланова поменутих низова којима одговара највећи параметар скалирања Вејбулове расподеле еквивалентних чврстоћа. У свакој следећој итерацији се низови претпостављених вредности параметара згушњавају око максималних вредности претходне итерације, а корак смањује 10 пута. На крају пете итерације добијамо коначне вредности параметара a и b са тачношћу 10^{-5} , која се сматра задовољавајућом у случају примене Сендецкијевог модела.

5.2.5 Дијаграми константног века трајања

Како је у поглављу 5.2.1 већ напоменуто, S-N крива се одређује на основу експерименталних резултата добијених испитивањем оптерећењем на замор са унапред одређеном фреквенцијом и степеном асиметрије циклуса. Тако, свака S-N крива је везана за јединствену вредност R . Генерално, за ову вредност се најчешће бира $R=-1$, што одговара потпуно променљивом оптерећењу. У случају адхезионих спојева, с обзиром да су они најосетљивији на затезање, испитивања се најчешће врше оптерећењем на замор затезањем, са степеном асиметрије циклуса $R=0,1$, што подразумева да је $S_{\min}=0,1 S_{\max}$. Међутим, S-N криве су веома зависне од вредности параметра R . Објашњење за то лежи у чињеници да његово повећање проузрокује и повећање вредности средње и минималне силе циклуса, у случају да се на ординати приказује вредност максималне силе (једначине (5.18) и (5.19)); односно средње, минималне и максималне силе, у случају да ордината означава амплитуду (једначине (5.20)-(5.22)). Тако, са повећањем вредности R , при истој вредности ординате добија се краћи век трајања узорака.

$$S_m = \frac{(1+R)}{2} S_{\max} \quad (5.18)$$

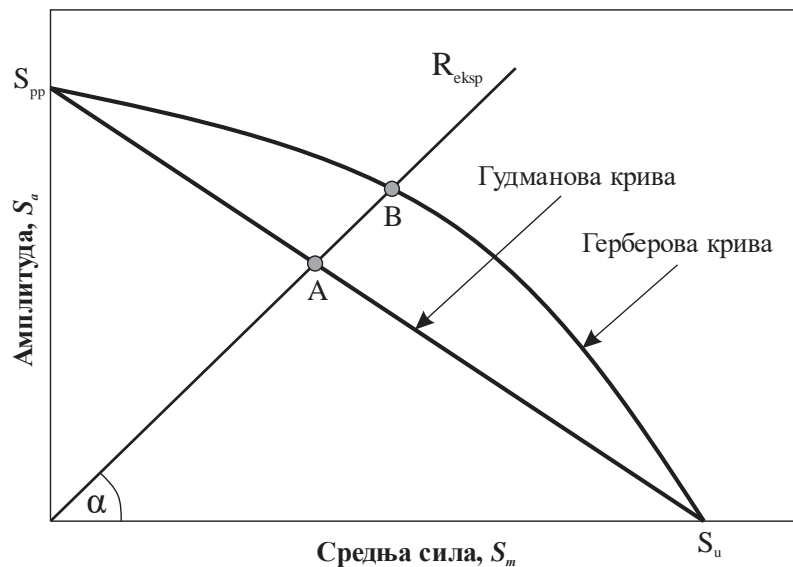
$$S_{\min} = R \cdot S_{\max} \quad (5.19)$$

$$S_m = \frac{(1+R)}{(1-R)} S_a \quad (5.20)$$

$$S_{\min} = \frac{R}{(1-R)} S_a \quad (5.21)$$

$$S_{\max} = \frac{2}{(1-R)} S_a \quad (5.22)$$

Постоје различите методе помоћу којих се на основу S-N криве, одређене за једну вредност R , може одредити S-N крива која одговара произвољно изабраној вредности R . Ово је веома значајно у случајевима променљивих цикличних оптерећења, која се састоје од великог броја циклуса различитих степена асиметрије циклуса. Најчешће се у ову сврху користе дијаграми константног века трајања, који представљају графичке репрезентације безбедног режима оптерећења на замор за одређени век трајања. Први их је крајем XIX представио Милер (Müller), касније праћен различитим ауторима, међу којима су Гербер (Gerber) [101] и Гудман (Goodman) [102]. Међутим најпознатију интерпретацију дијаграма константног века трајања представио је Хајг (Haigh) [103], па се они у литератури често називају и Хајговим дијаграмима (слика 5.10). На овим дијаграмима се представља однос средњих сила (апсциса) и амплитуда (ордината) при којима елементи имају исти век трајања.



Слика 5.10 Хајгов дијаграм, Герберова и Гудманова крива

Најзаступљенији математички модели дијаграма константног века трајања су Герберов и Гудманов. Иако се показало да у одређеним случајевима не дају најтачнија решења, чињеница да спадају у конзервативне и најједноставније моделе је значајно допринела њиховој широкој употреби. Изражени су следећим једначинама:

$$\text{Гудманов модел} \quad \frac{S_a}{S_{pp}} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad (5.23)$$

$$\text{Герберов модел} \quad \frac{S_a}{S_{pp}} + \left(\frac{S_m}{S_u} \right)^2 = 1 \quad (5.24)$$

где је S_{pp} амплитуда потпуно променљивог оптерећења ($R=-1$) при којој долази до лома након броја циклуса за који се одређује дијаграм константног века трајања, S_u статичка чврстоћа, S_a амплитуда и S_m средња сила. За конструисање дијаграма довољно је одредити статичку чврстоћу и амплитуду потпуно променљивог циклуса. Међутим, помоћу S-N криве конструисане за било коју експерименталну вредност $R=R_{eksp}$, применом једначина (5.23) и (5.24) могуће је једноставно одредити линије константног века трајања. Свака права повучена из координатног почетка навише представља линију на којој се налазе подаци о амплитуди и средњој сили за одређену вредност R_{eksp} . У пресеку овако повучене праве и линије константног века трајања добија се податак о амплитуди и максималној сили при којој долази до лома након броја циклуса одређених том кривом. Нагиб криве, изражен преко R , одређује се једначином:

$$tg \alpha = \frac{1-R}{1+R}, \quad (5.25)$$

На примеру приказаном на слици 5.10 тачке А и В представљају случајеве са истим веком трајања, с тим што се тачком В предвиђа већа средња сила и амплитуда. У складу са тим, може се закључити да Гудманова крива даје конзервативнија предвиђања века трајања у односу на Герберову.

5.2.6 ε -N (деформација-век) приступ

Овај приступ се односи на подручје цикличног оптерећења у коме су пластичне деформације довољно велике, па се могу мерити. У таквим случајевима напони су углавном већи од границе течења, а век трајања мањи од 10^4 циклуса. Математички модели који се користе у оквиру овог приступа углавном представљају век трајања као функцију амплитуде пластичне деформације. Уколико је век трајања знатно већи, нпр. већи од 10^5 циклуса, пластичне деформације су изузетно мале, практично немерљиве, па се овакви модели не могу применити. У складу са тим, њих углавном користе као моделе за анализу замора у нискоцикличном подручју. Међутим, адхезиони спојеви по

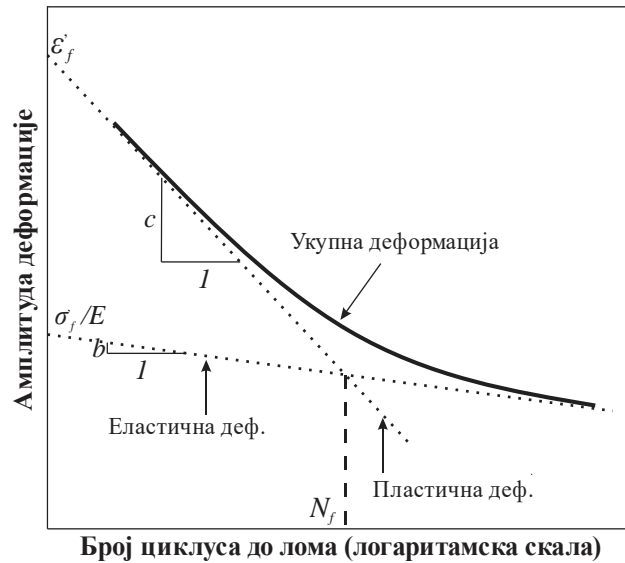


правилу садрже тачке концентрације напона, па у зонама око тих тачака долази до прекорачења границе течења и формирања пластичних зона. Тако, модели за анализу замора у нискоцикличном подручју су према својој суштини примењиви на адхезионе спојеве без обзира на број циклуса при коме долази до лома. У [104] је овакав модел дао добре резултате у предвиђању века трајања адхезионих смичућих спојева у подручју високоцикличног замора.

Прве ε - N моделе у исто време, независно један од другог, објавили су Кофин (Coffin) [105] и Менсон (Manson) [106]. Они су предложили релације којима се одређује век трајања на основу промене деформација са бројем циклуса. Наиме, када је материјал изложен дејству цикличног оптерећења константне амплитуде, деформација која се при томе дешава се мења, те временом долази до смањења или повећања амплитуде деформације. Укупна амплитуда деформација $\frac{\Delta\varepsilon_{tot}}{2}$ је једнака збиру амплитуда еластичне, $\frac{\Delta\varepsilon_{el}}{2}$, и пластичне деформације, $\frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{2}$, при чему се као функција броја циклуса до лома може изразити као:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{tot}}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_{el}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{2} = \frac{\sigma_f}{E} N^b + \varepsilon_f' N^{c_d}, \quad (5.26)$$

где су b експонент заморне чврстоће који одговара нагибу S - N криве (експонент Баскиновог модела), c_d експонент заморне дуктилности, σ_f коефицијент заморне чврстоће, ε_f' коефицијент заморне дуктилности и E модул еластичности. Величине које фигуришу у једначини (5.26) илустроване су на слици 5.11.



Слика 5.11 ε - N дијаграм према Кофин-Менсоновој једначини

Једначина (5.26) је изведена за потпуно променљиво циклично оптерећење ($R = -1$) и у литератури је позната као Кофин-Менсонова једначина. Утицај средњег напона, σ_m , на век трајања најпре је обухватио Мороу (Morrow), заменивши у једначини (5.26) σ_f са $(\sigma_f - \sigma_m)$, а касније додатно и Менсон и Халфорд (Halford),

помноживши други члан једначине са $\left(\frac{\sigma_f - \sigma_m}{\sigma_f}\right)^{c_d/b}$ [107].

Концентрације напона у великој мери компликују примену ε - N приступа у предвиђању века трајања. У том случају се анализира напонско-деформацијско стање у околини тачке концентрације напона, до кога се може доћи на више начина: експерименталним путем (мерним тракама), употребом различитих комерцијалних софтвера на бази методе коначних елемената (МКЕ) и помоћу методе успостављања веза локалних напона и деформација са њиховим номиналним вредностима. Прву методу је у неким случајевима немогуће употребити због сложености конфигурације споја, односно немогућности правилног постављања мерних трака. Употреба програма на бази МКЕ може бити изузетно компликована и дуготрајна. Трећа метода је најзаступљенија, али компликована за имплементацију. У области еластичности су фактори концентрације напона и деформације (K_σ и K_ε), који представљају однос стварног напона и деформације (σ и ε) и номиналног напона и деформације (σ_n и ε_n), једнаки теоријском фактору концентрације напона (K_t). Међутим, у области изнад границе еластичности напони и деформације престају да буду пропорционални, па су

поменути коефицијенти различити од теоријских вредности. Њихов однос, за случајеве оштрих и параболичних дисконтинуитета, Нојбер (Neuber) [108] је дефинисао изразом:

$$\sqrt{K_{\sigma} K_{\varepsilon}} = K_t. \quad (5.27)$$

Касније су предложени и други изрази који су успешно примењени при предвиђању века трајања адхезионих спојева на бази анализе локалног напонско-деформацијског стања (видети [104]).

ε - N приступ је компликован за имплементацију код адхезионих спојева, пре свега због постојања критичних тачака концентрације напона. Још један отежавајући фактор је чињеница да се параметри Кофин-Менсоновог модела могу добити искључиво испитивањем епрувета направљених од адхезива, при чему је познато да су својства адхезива добијена на овај начин другачија од оних добијених испитивањем адхезива у спојевима [109,110]. Стога, ε - N приступ неће бити коришћен у анализи понашања адхезива у оквиру ове дисертације.

5.2.7 Механика оштећења

У неким истраживањима, за предвиђање века трајања адхезионих спојева успешно је примењена механика оштећења. У овом приступу се уводи појам ефективног напона, који одговара степену оштећења материјала израженом преко параметра оштећења D . Она се у највећој мери заснива на раду Лметра (Lemaitre) [111] и Качанова (Kachanov) [112]. Параметар D представља оштећење материјала као ефективну површинску густину прелина [113] и може се представити следећом једначином:

$$D = \frac{A - A_e}{A}, \quad (5.28)$$

где је A површина посматраног пресека а A_e ефективна (носећа) површина. Ефективни напон у пресеку се може изразити следећом једначином:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_n}{1 - D}, \quad (5.29)$$

где је σ^* ефективни напон а σ_n номинални напон у пресеку.

С обзиром да се параметар D , дефинисан једначином (5.28), односи на одређену површ, он представља векторску величину, повезану са вектором нормале на ту површ. Претпоставком изотропног оштећења материјала D се своди на скалар, што у многеме олакшава примену овог приступа. Његова вредност у случају неоштећеног узорка је једнака 0, док у тренутку лома она достиже вредност 1. Међутим, између ове две вредности постоји, у пракси још значајнија, критична вредност параметра оштећења, D_c . Она означава тренутак појаве прслине, и обично се налази у интервалу 0,2-0,8 [109], у зависности од материјала.

Основни проблем у одређивању вредности параметра D је чињеница да је готово немогуће физички одредити стање микропрслина у одређеном материјалу. Због тога се параметар оштећења често изражава преко неке феноменолошки репрезентативне величине, као што је модул еластичности или крутост. Тако, вредност параметра оштећења у функцији броја циклуса коме је узорак био изложен је могуће изразити следећом једначином:

$$D(n) = 1 - \frac{E(n)}{E_0}, \quad (5.30)$$

где је E модул еластичности првог циклуса оптерећења а $E(n)$ модул еластичности оштећеног материјала након n циклуса оптерећења.

Овај приступ је на предвиђање века трајања адхезионих спојева у случају нискоцикличног замора први применио Вахаб (Wahab) [114]. У свом раду, прираштај оштећења са порастом броја циклуса он је изразио једначином:

$$\frac{\partial D}{\partial n} = A \frac{\sigma_{eq\max}^{\beta+m} - \sigma_{eq\min}^{\beta+m}}{(1-D)^{\beta+m}} R_v^{\beta/2}, \quad (5.31)$$

где су A , β и m параметри материјала, $\sigma_{eq\max}$ и $\sigma_{eq\min}$ су максимални и минимални фон Мизесов напон у једном циклусу, а R_v напонска функција (triaxiality function) дата једначином (5.32):

$$R_v = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left[\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right]^2. \quad (5.32)$$

У једначини (5.32) σ_H је средњи нормални напон, односно хидростатички напон (hydrostatic stress) а σ_{eq} Фон Мизесов напон. Интеграљењем једначине (5.31) уз гранични услов да је за неоштећени материјал $D = 0$, добија се оштећење као функција броја циклуса:

$$D = 1 - \left[1 - A(\beta + m + 1) (\sigma_{eq \max}^{\beta+m} - \sigma_{eq \min}^{\beta+m}) R_v^{\beta/2} n \right]^{\frac{1}{\beta+m+1}}. \quad (5.33)$$

Применом услова да у тренутку лома важи да је $n = N$ и $D = 1$, век трајања се изражава следећом једначином:

$$N = \frac{(\sigma_{eq \max}^{\beta+m} - \sigma_{eq \min}^{\beta+m})^{-1} R_v^{-\beta/2}}{A(\beta + m + 1)} \quad (5.34)$$

Параметри једначине (5.34) се могу одредити фитовањем према експерименталним подацима о веку трајања. За то је такође неопходно познавање механичких својстава материјала (добијених статичким испитивањем) и употреба методе коначних елемената за одређивање фон Мизесовог напона и вредности напонске функције. Ограничење овог модела је да он подразумева кохезиони лом унутар слоја адхезива. Међутим, у највећем броју случајева овај услов је испуњен.

Исти аутор је у [115] предложио изразе за одређивање параметра оштећења и века трајања (једначине (5.35) и (5.36)) за случај високоцикличног замора.

$$D = 1 - \left[1 - A(\beta + 3) (\sigma_{eq \max}^{\beta+2} - \sigma_{eq \min}^{\beta+2}) R_v^{\frac{\beta}{2}+1} n \right]^{\frac{1}{\beta+3}} \quad (5.35)$$

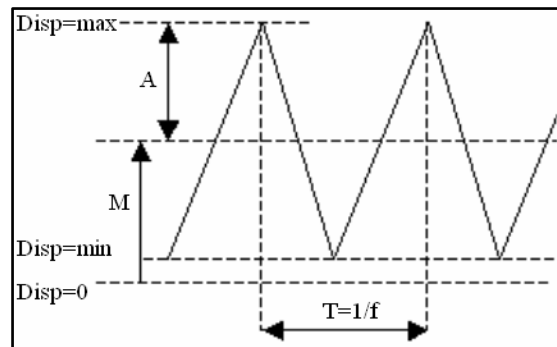
$$N = \frac{(\sigma_{eq \max}^{\beta+2} - \sigma_{eq \min}^{\beta+2})^{-1} R_v^{\frac{\beta}{2}-1}}{A(\beta + 3)} \quad (5.36)$$

Посебна пажња у примени механике оштећења за предвиђање понашања адхезионих спојева под дејством оптерећења на замор се посвећује мерењу параметра оштећења. У [116] параметар оштећења мерен испитивањем узорака контролисаном деформацијом у подручју нискоцикличног замора (слика 5.12). Са порастом броја циклуса долази до промене измерених вредности максималне и минималне силе (σ_{\max}

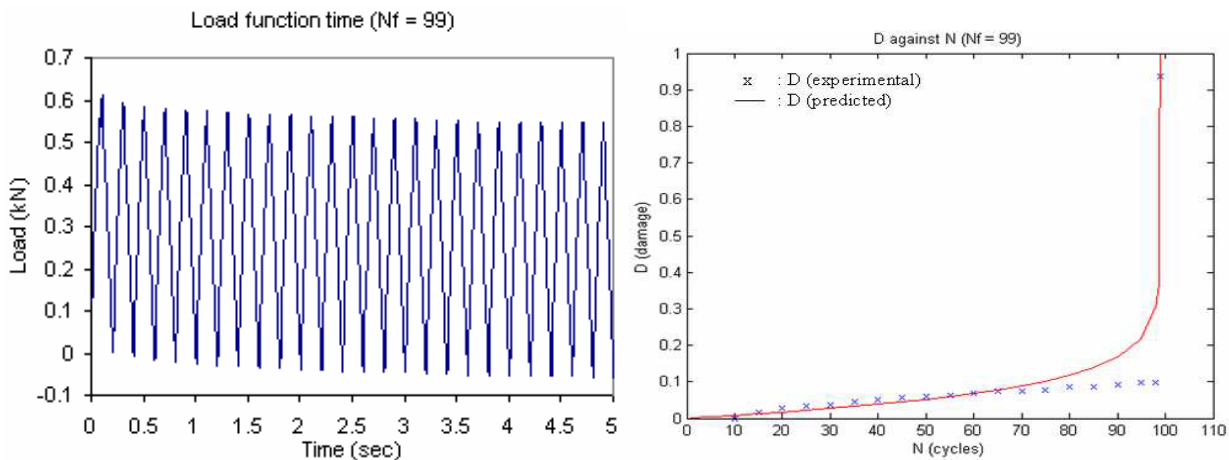
и σ_{\min}), односно опсега силе ($\Delta\sigma$) (слика 5.13а). Параметар оштећења (слика 5.13б) је дефинисан релативном променом опсега силе и изражен једначином:

$$D = 1 - \frac{\Delta\sigma(n)}{\Delta\sigma_0}, \quad (5.37)$$

где је $\Delta\sigma(n)$ опсег напона неоштећеног узорка (опсег првог циклуса), а $\Delta\sigma(n)$ опсег напона након n циклуса.



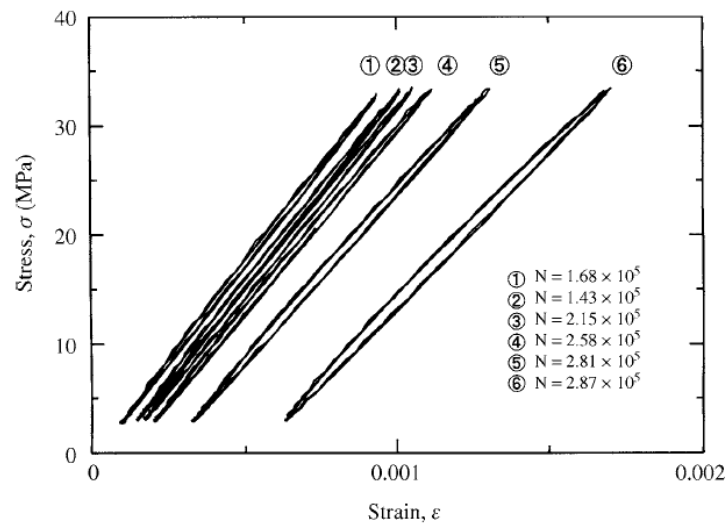
Слика 5.12 Оптерећење контролисаном деформацијом [116]



Слика 5.13 Мерење параметра оштећења контролисаном деформацијом: а) опсег силе б) дијаграм параметар оштећења–циклус, према [116]

Иманака је у [117] за мерење вредности параметра оштећења у подручју високоцикличног замора користио резултате испитивања узорка контролисаном силом. Мерним тракама је мерио дилатације на два супротна краја аксијално напрегнутог чеоног споја. Са порастом броја циклуса промењен је нагиб хистерезисне петље (слика 5.14), који је пропорционалан модулу еластичности. Са овако добијеним експерименталним подацима, помоћу једначине (5.30) је одредио дијаграм оштећења.

Фитовањем аналитичког модела налик једначинама (5.33) и (5.35) према добијеном дијаграму одређују се непознати параметри.



Слика 5.14 Промена нагиба хистерезисне петље са порастом броја циклуса, према [117]

У оквиру ове дисертације, у поглављу 5.2.10 је предложена метода за предвиђање века трајања адхезионих спојева заснована на механици оштећења. Она подразумева одређивање параметра оштећења поступком сличним ономе који је предложио Иманака.

5.2.8 Принцип преостале чврстоће

Како је у поглављима 5.2.1, 5.2.4 и 5.2.5 приказано, приступи сила-век и деформација-век, као и теорија механике оштећења представљају веома корисне алате за предвиђање века трајања адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења. Међутим, сваку од поменутих метода карактеришу одређени недостаци у том погледу. Помоћу S-N кривих једноставно је одредити век трајања за одређени ниво оптерећења константне амплитуде. Одређивање ових кривих, заправо, представља предуслов за друге методе. Међутим, оне нам не дају увид у развој оштећења у току експлоатације, што је врло често веома значајан податак. Са друге стране, приступ деформација-век захтева праћење промене деформације са порастом броја циклуса коме је спој изложен, што није увек могуће реализовати. Такође, у инжењерској пракси ову методу није лако имплементирати јер су конструкције најчешће изложене променљивом цикличном оптерећењу са повременим знатним скоковима, па је само познавање крутости недовољно за предвиђање лома, који најчешће наступа у тренутку скока оптерећења. Међутим, подаци о промени крутости могу бити од велике користи за праћење стања



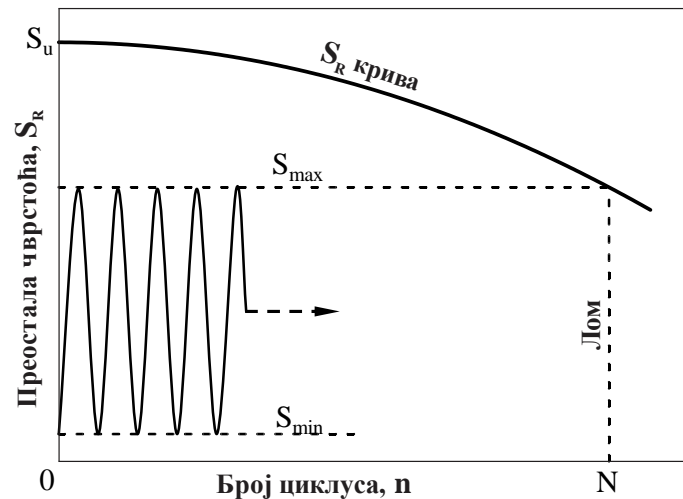
оштећења спојева, а самим тим и најаву лома (видети поглавље 5.2.10). Примена теорије механике оштећења представља најпрецизнији од поменута три приступа, али је у инжењерској пракси често врло тешко одредити параметре модела.

Конструкције у грађевинарству се углавном димензионишу према процењеним екстремним случајевима оптерећења који се могу јавити у току експлоатације. Међутим, оне су такође током целог експлоатационог века изложене променљивом цикличном оптерећењу знатно нижег интензитета од екстремних утицаја за које су димензионисане. Оно узрокује акумулацију оштећења, што доводи до смањења статичке чврстоће. Експерименталним истраживањем преостале чврстоће након одређеног броја циклуса константне амплитуде могуће је одредити дијаграм опадања чврстоће адхезионих спојева. Ова метода се увелико употребљава за предвиђање века трајања композита [100,118,119], а последњих година је њена употреба проширена и на адхезионе спојеве [91,109,120]. Предност ове методе је могућност њене директне инжењерске примене, јер се податак преосталој чврстоћи може употребити за одређивање носивости одређеног елемента или конструкције у току њихове експлоатације.

Филозофија модела преостале чврстоће приказана је на слици 5.15. Она се може претпоставити као монотono опадајућа функција:

$$S_R = f(S_u, S_{\max}, n, \zeta, R), \quad (5.38)$$

где је S_u статичка чврстоћа споја, S_{\max} максимална сила, n број циклуса, ζ скуп параметара чије се вредности одређују на основу експерименталних података и R степен асиметрије циклуса. У највећем броју модела преостале чврстоће R није члан функције, али је познато да тренд опадања чврстоће зависи од овог параметра, па је и сама функција (параметри функције) зависна од њега. У случају када је број циклуса $n=0$ (неоптерећени узорак) преостала чврстоћа је једнака статичкој чврстоћи, док је након $n=N$ циклуса вредност преостале чврстоће једнака максималној сили, те долази до лома.



Слика 5.15 Крива преостале чврстоће

Дијаграм преостале чврстоће може имати различите облике. Да би се одредио његов облик, најпре је неопходно експериментално утврдити вредност статичке чврстоће узорака, а често и облик S-N криве, јер се у највећем броју модела уместо броја циклуса користи однос броја циклуса и века трајања $\frac{n}{N}$ (фракција века трајања). Облик средишњег дела дијаграма (између $n = 0$ и $n = N$) експериментално се утврђује статичким испитивањем узорака који су претходно оптерећени унапред одређеним бројем циклуса, мањим од века трајања. Најчешће се врши по неколико поновљених тестова при више различитих фракција. Један од највећих проблема у одређивању облика криве је чињеница да је немогуће одредити век трајања и преосталу чврстоћу истог узорка, јер се обе вредности добијају разарајућим тестовима. Уместо тога, користи се век трајања предвиђен S-N кривом. Ово у одређеној мери отежава одређивање преостале чврстоће при већим вредностима фракција века трајања. Разлог за то је чињеница да су резултати испитивања за одређивање S-N криве најчешће показују високи степен расипања. У тим случајевима се број циклуса налази у зони расипања S-N криве, те може доћи до превременог лома узорка.

У литератури су модели преостале чврстоће класификовани на различите начине: као пробабилистички и детерминистички; линеарни и нелинеарни; модели са значајним иницијалним падом чврстоће и модели са наглим падом на крају века трајања. У овом поглављу акценат је стављен на линеарне и нелинеарне детерминистичке моделе. Најједноставнији модел предложили су Браутман и Саху

(Broutman & Sahu) [121]. Они су претпоставили линеарну промену чврстоће од S_u до S_{\max} и извели следећу детерминистичку једначину:

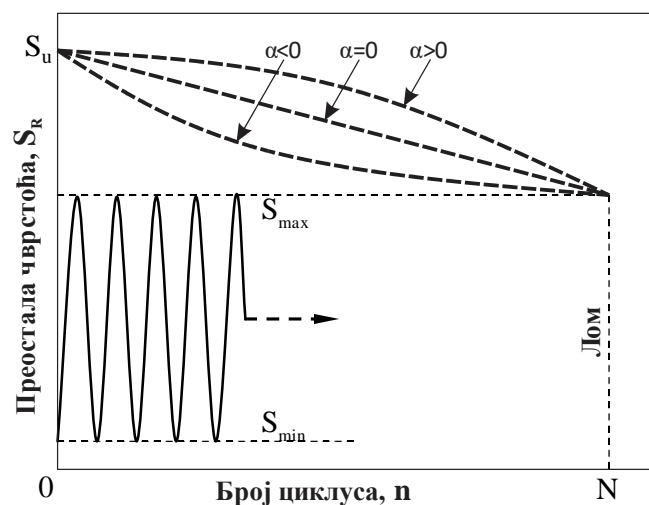
$$S_R = S_u - (S_u - S_{\max}) \left(\frac{n}{N} \right). \quad (5.39)$$

Предност овог модела је у томе што не захтева експерименталне резултате за одређивање облика криве. Међутим, с обзиром да је деградација чврстоће углавном нелинеарног карактера, једначина (5.39) врло често даје неодговарајуће резултате. Касније су предложени модели који узимају у обзир нелинеарни карактер деградације чврстоће [96,100,122–124].

За разлику од приказаног модела, код кога преостала чврстоћа опада линеарно са порастом броја циклуса, код нелинеарних модела се различитим параметрима могу представити и појаве као што су „брзи“ иницијални губитак чврстоће (initial loss of strength) или нагли лом (sudden death). На ове појаве је указано у [100,124–126]. Шаф и Дејвидсон (Schaff & Davidson) су предложили модел који заправо представља модификацију једначине (5.39). Они су, ради бољег описивања нелинеарне деградације чврстоће, поменутом моделу додали параметар α . Тако, израз који су предложили за прорачун преостале чврстоће има облик:

$$S_R = S_u - (S_u - S_{\max}) \left(\frac{n}{N} \right)^\alpha. \quad (5.40)$$

где се α одређује фитовањем експерименталних података. На слици 5.16 је приказан утицај вредности параметра α на облик криве преостале чврстоће.



Слика 5.16 – Преостала чврстоћа - утицај параметра α

Очигледно је да се за $\alpha=1$ једначина (5.40) своди на облик једначине (5.39). Уколико параметар има вредност $\alpha>1$ крива представља спори иницијални губитак чврстоће, праћен бржим губитком чврстоће са порастом броја циклуса, односно наглим ломом када је $\alpha\gg 1$. У случају да је $\alpha<1$, након брзог иницијалног губитка чврстоће, њена вредност спорије опада до тренутка лома. Philippidis и Passipoularidis су у [100] предложили коришћење променљивог параметра α , датог следећим изразом:

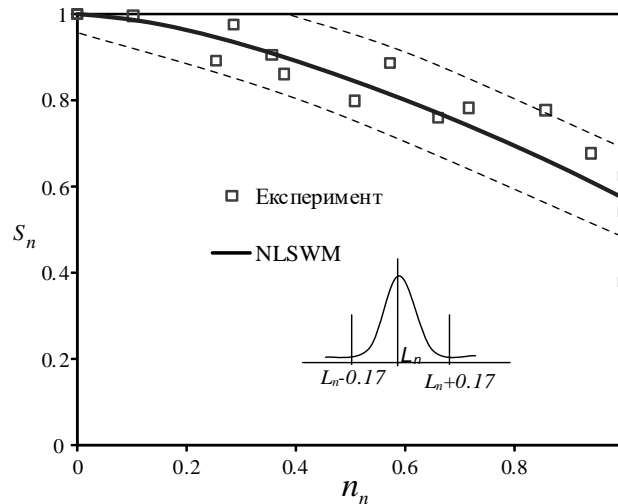
$$\alpha = k_1 \exp\left(k_2 \frac{n}{N}\right). \quad (5.41)$$

где су k_1 и k_2 коефицијенти који се добијају фитовањем експерименталних података. На овај начин је могуће постићи да крива деградације има стрмији почетни део након чега долази до спорије промене преостале чврстоће, праћене нагом деградацијом при крају века трајања.

Шеној (Shenoy) је у [120], испитујући деградацију чврстоће преклопних адхезионих спојева оптерећених на смицање затезањем, приметио да се, уколико се број циклуса подели са веком трајања (фракција века трајања – $n_n = \frac{n}{N}$), а преостала чврстоћа са статичком чврстоћом (нормализована преостала чврстоћа – $S_{R,n} = \frac{S_R}{S_u}$), добијени подаци налазе на истој линији на дијаграму $n_n - S_{R,n}$ (слика 5.17). У складу са тим, предложио је једначину коју је касније назвао „нормализовани нелинеарни модел деградације чврстоће“ (normalized non-linear strength wearout model – NNSWM [91]):

$$S_{R,n} = 1 - (1 - S_{\max,n}) \cdot (n_n)^\alpha, \quad (5.42)$$

где је $S_{\max,n}$ нормализована максимална сила, $S_{\max,n} = \frac{S_{\max}}{S_u}$.



Слика 5.17 Нормализовани дијаграм преостале чврстоће, према [120]

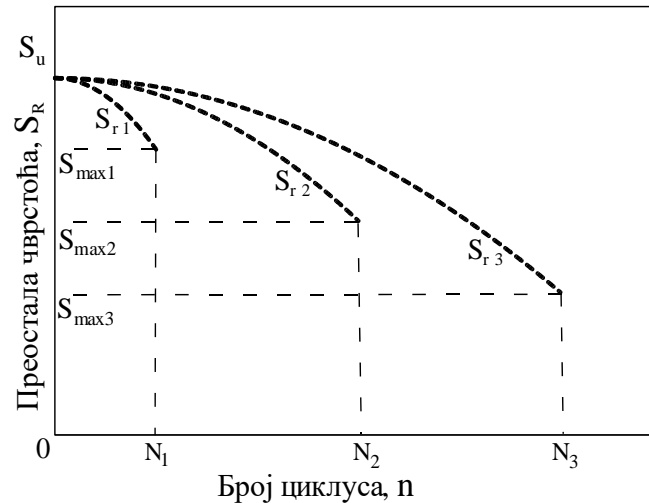
Филозофија модела који је Шеној предложио, иако је показано да даје одговарајуће резултате за експерименталне податке анализирани у [91,120], има одређене недостатке. У следећем поглављу су појашњени недостаци овог модела и предложен нови приступ анализе деградације чврстоће под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде.

5.2.9 Предлог математичког модела нормализоване резерве чврстоће

Принцип преостале чврстоће се у највећој мери користи као основа за предвиђање века трајања при дејству променљивог цикличног оптерећења. За то су неопходне посебне криве преостале чврстоће за сваки ниво оптерећења (видети поглавље 5.3.2). Модели преостале чврстоће, са изузетком линеарног модела Браутмана и Сахуа, захтевају експерименталне податке за одређивање непознатих параметара. При томе, пораст броја параметара узрокује пораст броја фракција века трајања које је неопходно испитати да би се добили одговарајући резултати. Имајући то у виду, јасно је да предвиђање века трајања применом овог приступа захтева скупа и дуготрајна (time consuming) испитивања. Шаф и Дејвидсон су поменути модел развили са циљем смањења обима експерименталног истраживања, али су при томе увели претпоставке које нису експериментално доказане. Шенојев принцип нормализације подразумева, иако то није био циљ истраживања, да се једна вредност параметра α може користити за описивање деградације при дејству свих посматраних нивоа оптерећења. Међутим, како је већ поменуто, сам приступ има одређене недостатке.

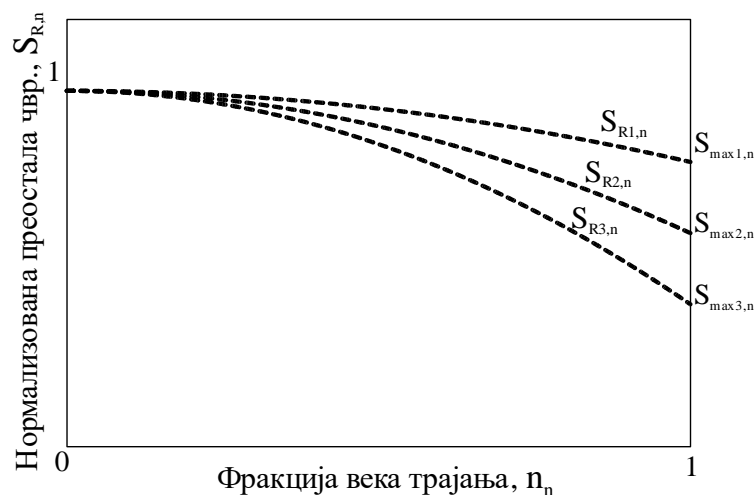
У оквиру овог истраживања развијен је модел који превазилази проблеме Шенојевог модела, а чији параметри могу бити независни од нивоа оптерећења. Самим

тим, може се користити за описивање деградације чврстоће адхезионих спојева при дејству произвољног нивоа оптерећења. У даљем тексту је приказан развој модела са освртом на проблеме који су превазиђени његовим извођењем.



Слика 5.18 Дијаграм преостале чврстоће (3 произвољна нивоа оптерећења)

На слици 5.18 су приказани дијаграми преостале чврстоће (S_{R1} , S_{R2} и S_{R3}) за три произвољна нивоа оптерећења, при чему је $S_{\max1} > S_{\max2} > S_{\max3}$. Делјењем преостале чврстоће са статичком чврстоћом, и броја циклуса са одговарајућим веком трајања добијају се дијаграми нормализоване преостале чврстоће ($S_{R1,n}$, $S_{R2,n}$ и $S_{R3,n}$), приказани на Слика 5.19.



Слика 5.19 Нормализована преостала чврстоћа (3 произвољна нивоа оптерећења)

Посматране три криве би се, теоретски, могле подударати само ако важи $S_{\max1,n} = S_{\max2,n} = S_{\max3,n}$, што овде није случај. Да би се превазишао овај проблем,

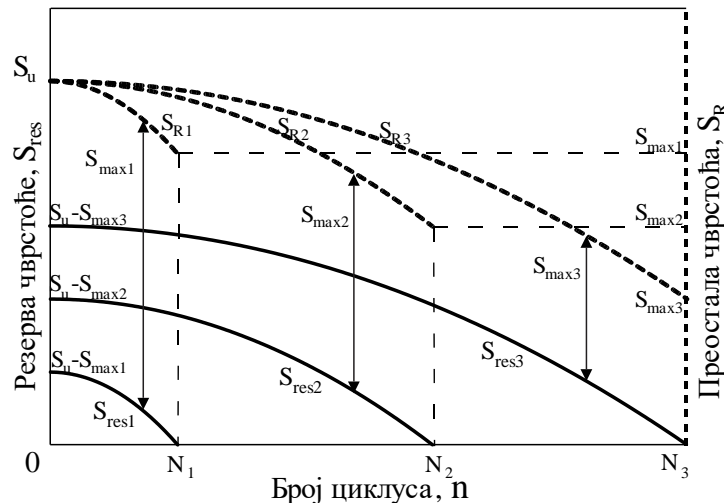
посматрана је разлика између преостале чврстоће и максималне силе цикличног оптерећења, коју називамо „резервом чврстоће“. Полазећи од модела Шафа и Дејвидсона (једначина (5.40)), резерва чврстоће је изражена следећом једначином:

$$S_{res} = S_R - S_{max} = [S_u - (S_u - S_{max})n_n^\alpha] - S_{max} \quad (5.43)$$

Применом елементарних трансформација израз (5.43) се може свести на следећи облик:

$$S_{res} = (S_u - S_{max})(1 - n_n^\alpha) \quad (5.44)$$

Израз (5.44) је илустрован на слици 5.20. Криве резерве чврстоће су добијене транслаторним померањем кривих S_{R1} , S_{R2} и S_{R3} по у оси за вредности S_{max1} , S_{max2} и S_{max3} , респективно.



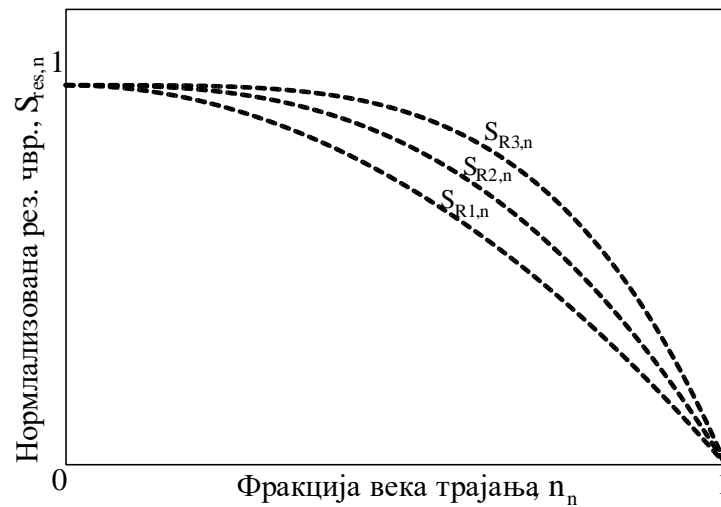
Слика 5.20 Принцип резерве чврстоће

Оне задовољавају граничне услове да пре доношења првог циклуса оптерећења ($n_n = 0$) резерва чврстоће има вредност $S_u - S_{max}$, док је у тренутку када број циклуса достиже век трајања N ($n_n = 1$) њена вредност једнака 0. У том тренутку наступа лом споја. На овако добијене криве могуће је применити принцип нормализације. Ако резерва чврстоће у било ком тренутку подели са својом почетном вредношћу (S_{res} при $n_n = 0$), дату једначином (5.45), добија се вредност који називамо „нормализована резерва чврстоће“ (НРЧ).

$$S_{res,i}^{ini} = S_u - S_{max,i} \quad (5.45)$$

$$S_{res,i,n} = \frac{S_{res,i}}{S_{res,i}^{ini}} = \frac{S_{R,i} - S_{max,i}}{S_u - S_{max,i}} = 1 - n_{n,i}^{\alpha_i} \quad (5.46)$$

У једначинама (5.45) и (5.46) $S_{res,i}^{ini}$, $S_{max,i}$, $n_{n,i}$, α_i , $S_{R,i}$ и $S_{res,i,n}$ су почетна резерва чврстоће, максимална сила, фракција века трајања, параметар модела, резерва чврстоће и НРЧ i -тог нивоа оптерећења, респективно. У случају када спој није претходно изложен цикличном оптерећењу ($n_n = 0$) вредност НРЧ једнака је 1, док је у тренутку када број циклуса достигне век трајања N ($n_n = 1$) њена вредност једнака 0.



Слика 5.21 Крива нормализоване резерве чврстоће

На слици 5.21 су приказани дијаграми НРЧ за три произвољно изабрана нивоа оптерећења. С обзиром да се њихови гранични услови подударају, ова три дијаграма се могу подударати уколико експериментални подаци покажу тенденцију ка истој кривој. У том случају ће вредности параметра α бити једнака у сва за сва три нивоа оптерећења ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$).

Као и у моделу Шафа и Дејвидсона, вредност параметра α одређује облик криве. Уколико је $\alpha > 1$, чврстоћа споја спорије опада у првом делу века трајања, док се са порастом броја циклуса опадање чврстоће убрзава. За параметар $\alpha \gg 1$ након спорог опадања чврстоће у току већег дела века трајања, долази до нагле деградације (sudden death). Када је $\alpha < 1$, након нагле деградације у почетном делу века трајање брзина опадања чврстоће се смањује све до отказа споја. Математичка природа предложеног модела не дозвољава комбинацију већег иницијалног опадања чврстоће, умереног смањења чврстоће у средишњем делу века трајања и нагле деградације на самом крају,

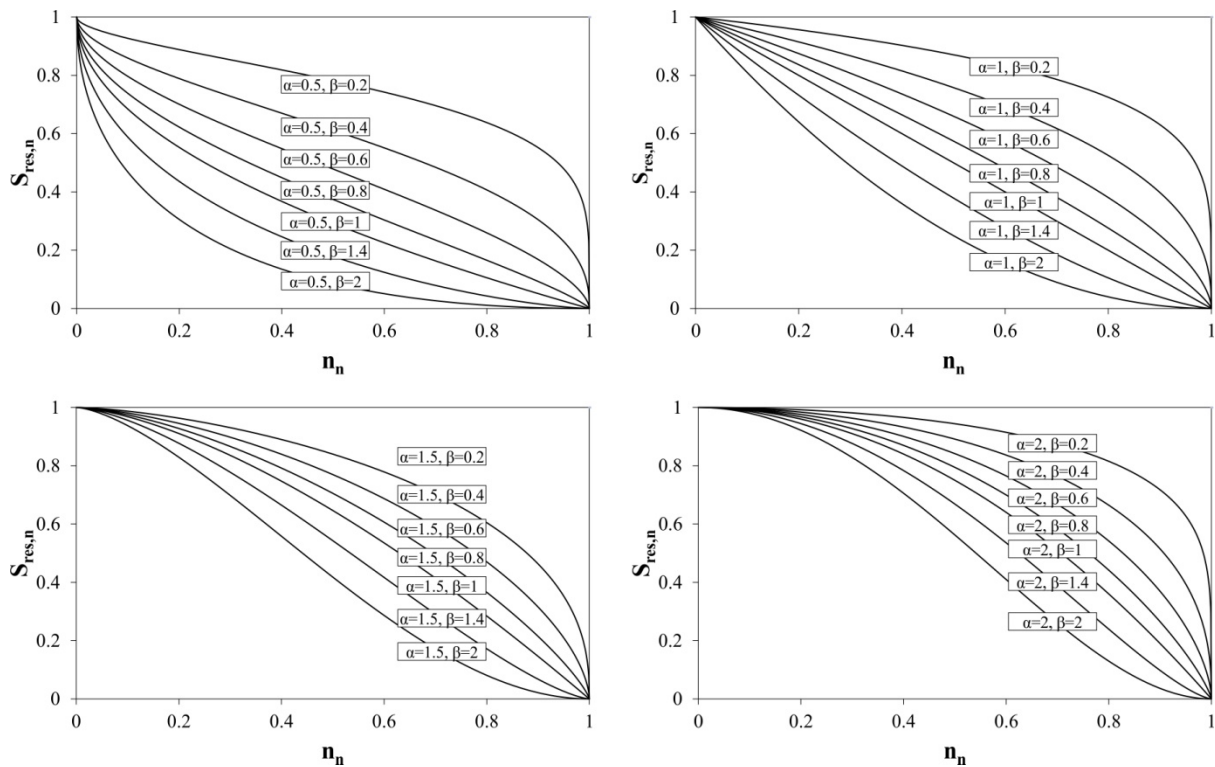
што је случај који се може јавити код адхезионих спојева [120]. Да би се омогућило описивање оваквих случајева моделом нормализације резерве чврстоће, у једначину (5.46) се уводи додатни параметар β . Тако, модел добија следећи облик:

$$S_{res,i,n} = (1 - n_{n,i}^\alpha)^\beta \quad (5.47)$$

Утицај параметра β илустрован је на слици 5.22, где је дат приказ дијаграма нормализоване резерве чврстоће у зависности од вредности параметара α и β . Са слике је јасно да једначина (5.47) може описати различите случајеве деградације чврстоће, као што су:

- линеарна деградација;
- нагли пад чврстоће непосредно пре лома;
- пад чврстоће на почетку дијаграма праћен споријом деградацијом у средњем делу и наглим падом чврстоће непосредно пре лома.

У случају када је $\beta = 1$, предложени модел одговара моделу преостале чврстоће који су предложили Шаф и Дејвидсон, док у случају када су оба параметра једнака 1, он једнак моделу Браутмана и Сахуа.



Слика 5.22 Утицај параметара α и β на облик дијаграма нормализоване резерве чврстоће

5.2.10 Предлог методе предвиђања века трајања разарајућим поступком испитивања

У претходним поглављима приказане су различите методе предвиђања века трајања адхезионих спојева под дејством константног цикличног оптерећења, као и методе за одређивање њиховог стања оштећења. Међутим, већина њих захтева експерименталне резултате добијене разарајућим поступцима испитивања. Осим тога, иако су сви представљени модели дати детерминистичким једначинама, њихова предвиђања имају пробабилистички карактер, с обзиром да она одговарају вредности 50% вероватноће реализације узорка. То значи да је у већини случајева предвиђена вредност мања или већа од појединачних вредности експерименталних узорака, односно да је неконзервативна у 50% случајева. Овакво предвиђање је у инжењерском смислу неприхватљиво. Решење за то могу представљати криве које се односе на 5% фракције експерименталних резултата, с обзиром на то да би такво предвиђање било на страни сигурности. Међутим, ако се посматра типична S-N крива, чињеница да резултати често показују високи степен расипања, као и да се век трајања углавном представља на логаритамској скали, значи да би овакво предвиђање могло дати грешку у односу на одређени узорак реда величине и више стотина процената. С обзиром на велико расипање резултата, идеална метода би подразумевала могућност предвиђања века трајања појединачног узорка. Наравно, то искључује могућност разарајућег испитивања посматраног узорка, а са друге стране подразумева да се параметри модела за предвиђање одреде испитивањем до лома истоветних узорака. Истраживања која су последњих година спроведена на адхезионим спојевима композитних адхерената показала су да посматрање промене крутости са порастом броја циклуса оптерећења представља приступ који је могуће искористити у сврху предвиђања века трајања, као и тренутка појаве макро прслине [127–129]. Међутим, овај приступ готово да није примењиван на адхезионе спојеве металних адхерената. У [130] је приказан дијаграм деградације крутости адхезионих спојева металних елемената у аутоиндустрији, али није коришћен за предвиђање њиховог лома. Међутим, адхезиони спојеви металних адхерената се најчешће понашају веома слично спојевима композитних материјала, поготово у случају композита већих крутости. Разлог за то је чињеница да предуслов за квалитетан спој и његово предвидљиво понашање представља обезбеђивање адхезионих сила довољних да се локација лома „пресели“ унутар слоја адхезива. Тако, понашање споја углавном зависи од понашања самог адхезива.

У даљем тексту овог поглавља је, предложена метода за предвиђање века трајања адхезионих спојева заснована на резултатима неразарајућих испитивања. Развијена је на основу анализе математичких карактеристика потојећих модела из литературе и регистравања законитости у промени крутости адхезионих спојева композитних адхерената. У поглављу 6.3.2, биће приказана валидација предложеног модела помоћу експерименталних резултата испитивања адхезионих спојева типа метал-метал.

Предвиђање века трајања адхезионих спојева засновано на анализи промене крутости представља релативно нов концепт. Постоји свега неколико модела у доступној литератури. У њима се преостала крутост представља као функција почетне крутости и броја циклуса оптерећења. Ток промене крутости се, у зависности од експерименталних резултата, може представити различитим математичким функцијама као што су линеарна, степена, сигмоидна и др. Један од првих модела предложио је Витворт (Whitwort) [131]. Он је релативну крутост, $\bar{E}(n) = \frac{E(n)}{E_0}$, као функцију броја циклуса, n , нивоа оптерећења, S_{\max} , статичке чврстоће, S_u , и параметара h, m, c_1 и c_2 , који се одређују из експерименталних резултата, изразио следећом једначином:

$$\bar{E}(n) = \left[-h \ln(n+1) + \left(c_1 \frac{S_u}{S_{\max}} \right)^{m/c_2} + 1 \right]^{1/m}. \quad (5.48)$$

Келер (Keller) је у [128] предложио два различита типа модела (линеарни и нелинеарни) којима се описује деградација крутости. Линеарни модел (једначина (5.49)) зависи од нивоа оптерећења, док у нелинеарном моделу (једначина (5.50)) ниво оптерећења није један од параметара који дефинишу криву.

$$\frac{E(n)}{E_0} = 1 - k_1 \left(\frac{S_{\max}}{S_u} \right)^{k_2} n \quad (5.49)$$

$$\frac{E(n)}{E_0} = \left(\frac{n \cdot k^m}{V - n} \right)^{1/m} \quad (5.50)$$

Једначине (5.48) и (5.50) представљају тип такозваних сигмоидних функција, док је једначина (5.49), како је већ напоменуто, линеарна функција. Међутим оно што је заједничко за све њих је да омогућавају облик криве у коме је средишњи део готово

линеаран. Имајући то у виду, може се закључити да једначина (5.47), предложена за описивање деградације чврстоће, по својим својствима може бити одговарајућа и за описивање деградације крутости. Тако, израз за крутост споја у одређеном тренутку (након одређеног броја циклуса) се може написати у следећем облику:

$$E(n) = E_0 \left[1 - \left(\frac{n}{N} \right)^\alpha \right]^\beta \quad (5.51)$$

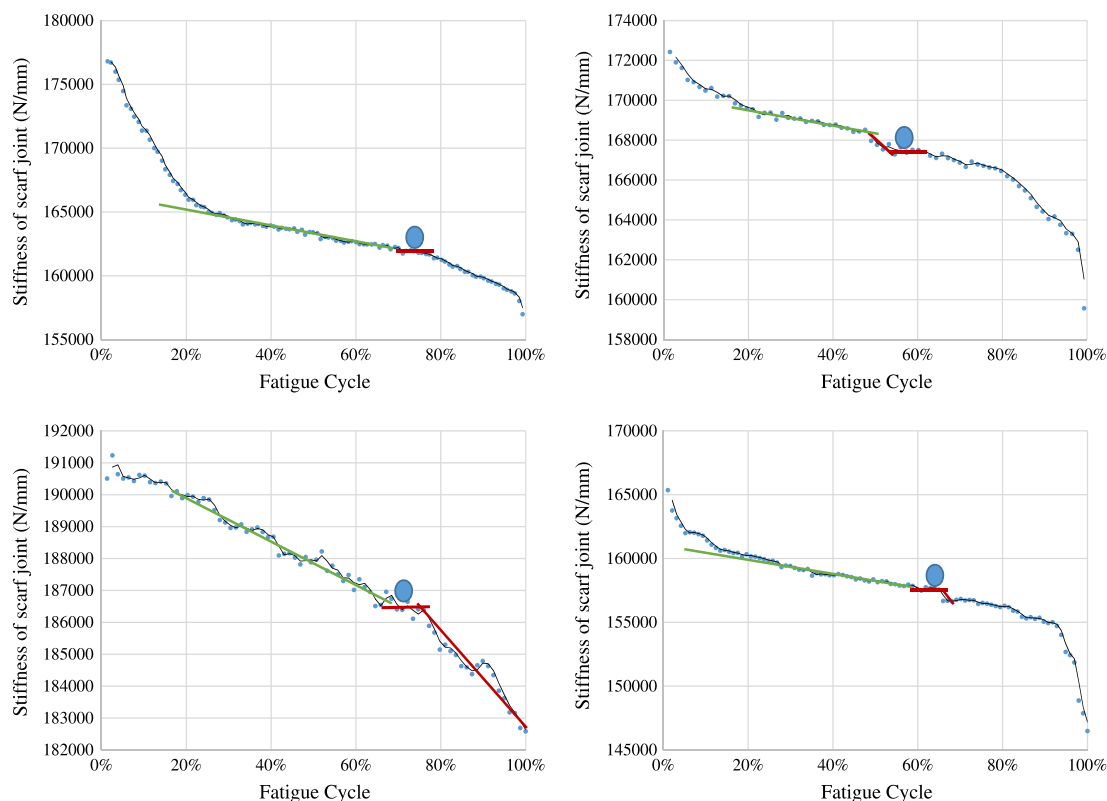
За одређивање параметара α и β неопходно је извршити испитивање узорка цикличним оптерећењем до лома, при чему ће се пратити и промена крутости са порастом броја циклуса. Вредности параметара могуће је одредити фитовањем модела према експерименталним подацима, применом методе најмањих квадрата. Претпоставља се да су параметри модела зависни искључиво од геометрије споја и својстава коришћених материјала. Уколико су познати параметри модела и крутост узорка након одређеног броја циклуса, његов век трајања се може одредити помоћу следећег изрази:

$$N = n \cdot \left[1 - \left(\frac{E(n)}{E_0} \right)^{1/\beta} \right]^{-1/\alpha} \quad (5.52)$$

Међутим, уколико се анализирају различити експериментални подаци из литературе, могу се приметити одређена ограничења предложеног, али и осталих приказаних модела, што је у даљем тексту илустровано.

На слици 5.23 су приказани резултати испитивања адхезионих преклопних спојева композитних адхерената типа Нех-ply914, компаније Нехсел, објављени у [129]. Узорци су испитивани цикличним оптерећењем до лома, при чему је праћена промена крутости. Развој оштећења се на дијаграмима деградације крутости може поделити у 3 области. У првој области готово сви узорци показују различито понашање, односно различити ниво деградације крутости. Аутори су то приписали присуству евентуалних аномалија, шупљина и мехурића ваздуха у слоју адхезива, као и могућим нечистоћама на самом споју адхезива и адхерената. Након релативно интензивне деградације долази до стабилизације споја, што означава почетак друге области. Крутост се у другој области мења знатно спорије и готово линеарно. Трећа област почиње појавом макро

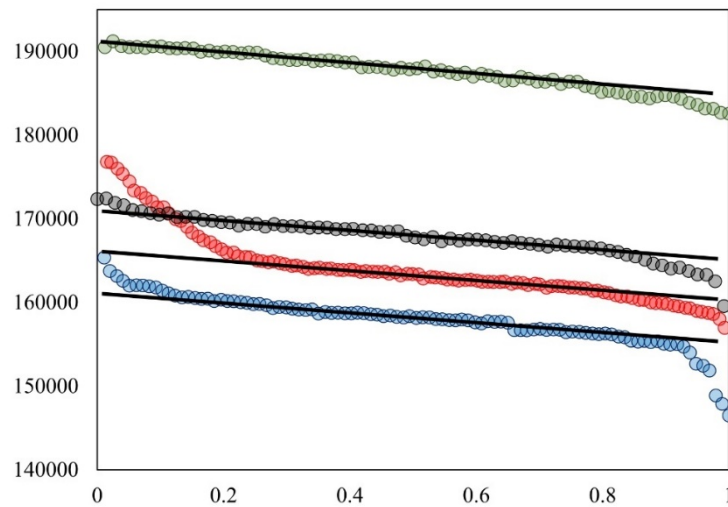
прслине, која се на дијаграму огледа у промени нагиба или одређеним



Слика 5.23 Експериментални резултати деградације крутости из [129]

дисконтинуитетима, што је на слици означено плавим круговима. У њој долази до нагле деградације крутости и лома. Највећи део века трајања одговара другој области деградације.

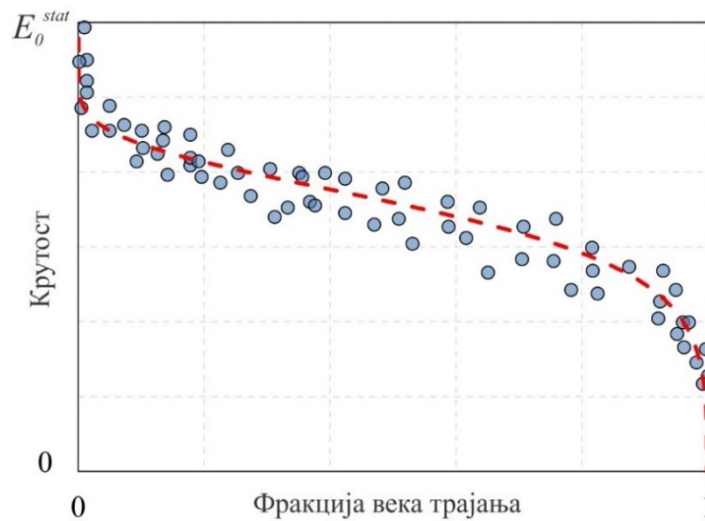
Помоћу софтвера WebPlotDigitizer [132] извршена је дигитализација графикана. Резултати су обједињени на слици 5.24. Може се приметити да је, без обзира на понашање узорака у првој области, деградација крутости у другој области паралелна код свих узорака. Са друге стране, иако није директно мерена, очигледно је да је почетна крутост различита у свим случајевима. Тако, коришћење јединствене вредности почетне крутости, као параметра материјала, може довести до тога да се, применом једначине (5.52), добију погрешна предвиђања века трајања. У складу са наведеним, основна идеја нове методе била је да се, предвиђање века трајања ново испитаних узорака врши фитовањем модела према експерименталним подацима, уз промену почетне крутости до вредности при којој долази до одговарајућег поклапања фитоване криве и експерименталних података на линеарном делу криве.



Слика 5.24 Поређење експерименталних кривих деградације крутости из [129]

Предложени поступак предвиђања века трајања помоћу резултата добијених праћењем промене крутости узорка састоји се из следећих корака:

- 1) Статичко испитивање одређеног броја узорака и утврђивање средње вредности почетне крутости споја.
- 2) Испитивање одређеног броја узорака цикличним оптерећењем до лома, уз праћење промене крутости, ради одређивања параметара модела датог једначином (5.51).
- 3) Обједињавање дијаграма промене крутости из 2. корака и одређивање параметара α и β фитовањем према експерименталним подацима (слика 5.25). При томе се за почетну вредност крутости усваја средња вредност из статичких испитивања.
- 4) Испитивање узорака до одређеног броја циклуса уз праћење промене крутости.
- 5) Одређивање века трајања испитаног узорака итеративним поступком фитовања модела према експерименталним подацима (слика 5.26). У овом кораку су α и β познати, почетна крутост се претпоставља у свакој итерацији, а век трајања се одређује фитовањем према експерименталним подацима у свакој итерацији. Итеративни поступак се прекида када линеарни део криве конструисане помоћу једначине (5.51) покаже поклапање са линеарним делом експерименталних података.

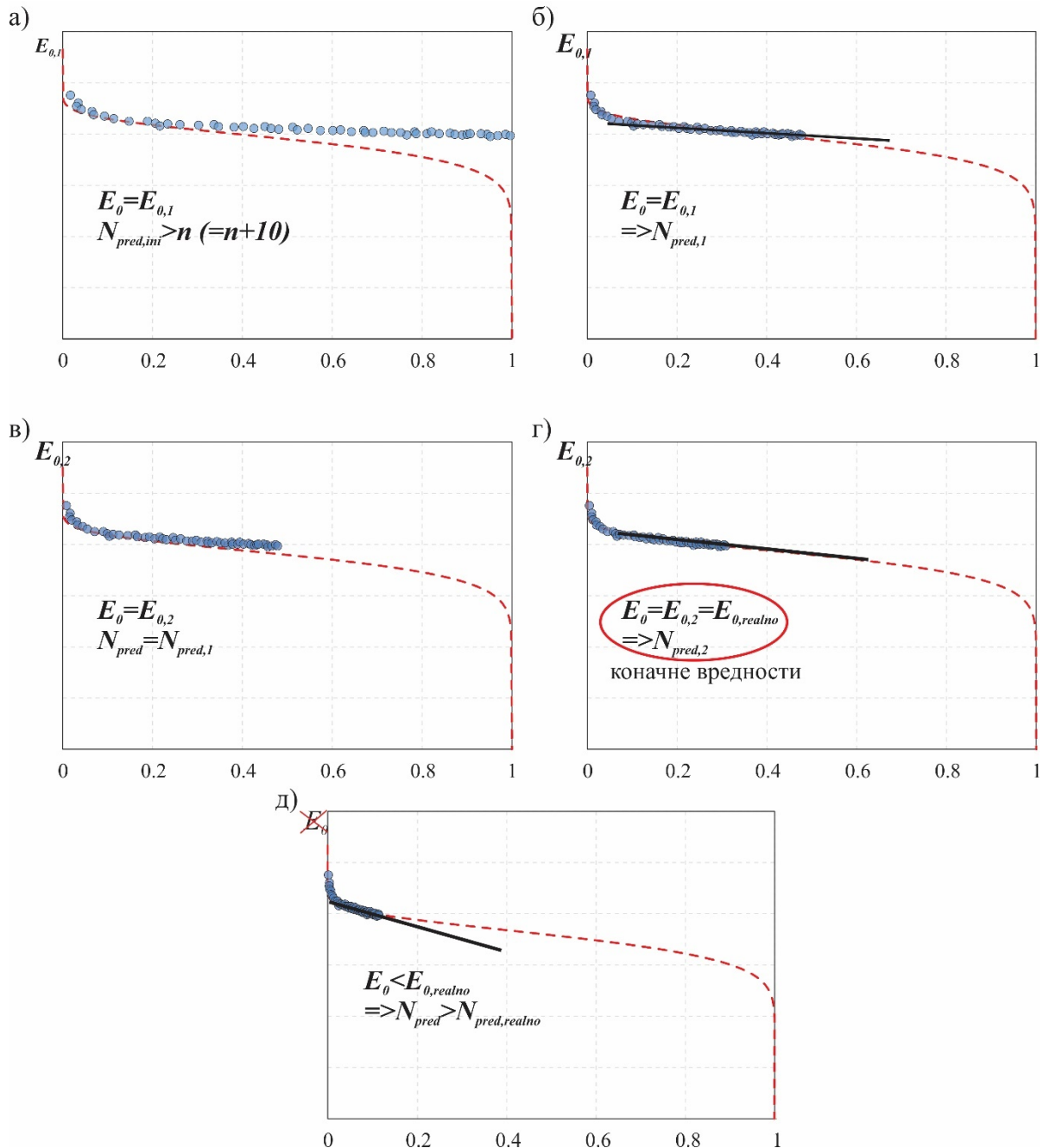


Слика 5.25 Одређивање параметара модела фитовањем криве према експерименталним подацима

Последњи корак описаног поступка ће бити детаљније објашњен и илустрован. Након одређивања параметара криве и праћења крутости узорка који је преживео n циклуса без лома, на графику (слика 5.26а) се приказују експериментални подаци и крива предвиђања, описана једначином (5.51). Параметри α и β криве су познати из ранијих корака, за почетну претпоставку века трајања се узима вредност већа од n , а вредност E_0 се узима тако да она тангира експерименталне податке са доње стране.

Применом неког од комерцијалних софтвера (у овом случају MS Office Excel), методом најмањих квадрата, одређује се вредност прве итерације предвиђеног века трајања узорка ($N_{\text{pred},1}$). Након тога, увођењем нове вредности века трајања, приказују се графикони експерименталних података и криве предвиђања (слика 5.26б). Уколико се нагиби линеарних делова криве предвиђања и експерименталних података не поклапају, неопходно је поново извршити корекцију почетне крутости. Овде постоје две две могућности. Прва је да се продужетак правца линеарног дела експерименталних података пружа изнад криве предвиђања (слика 5.26в). У том случају је предвиђени век трајања краћи од реалног, а почетна крутост се коригује тако што се снижава до вредности при којој крива предвиђања поново тангира експерименталне податке са доње стране (слика 5.26в). Друга могућност је да се продужетак правца линеарног дела експерименталних података пружа испод криве предвиђања (слика 5.26д), што значи да је предвиђени век трајања узорка неконзервативан. У том случају је неопходно вратити се на претходну итерацију и

извршити нешто мању промену почетне крутости. Након корекције почетне крутости, поново се методом најмањих квадрата одређује вредност следеће итерације века трајања. Итеративни поступак се понавља до одређивања комбинације почетне крутости и века трајања за које се линеарни делови експерименталних података и криве предвиђања подударaju (слика 5.26г).



Слика 5.26 Итеративни поступак одређивања века трајања

5.3 Анализа замора при дејству оптерећења променљиве амплитуде

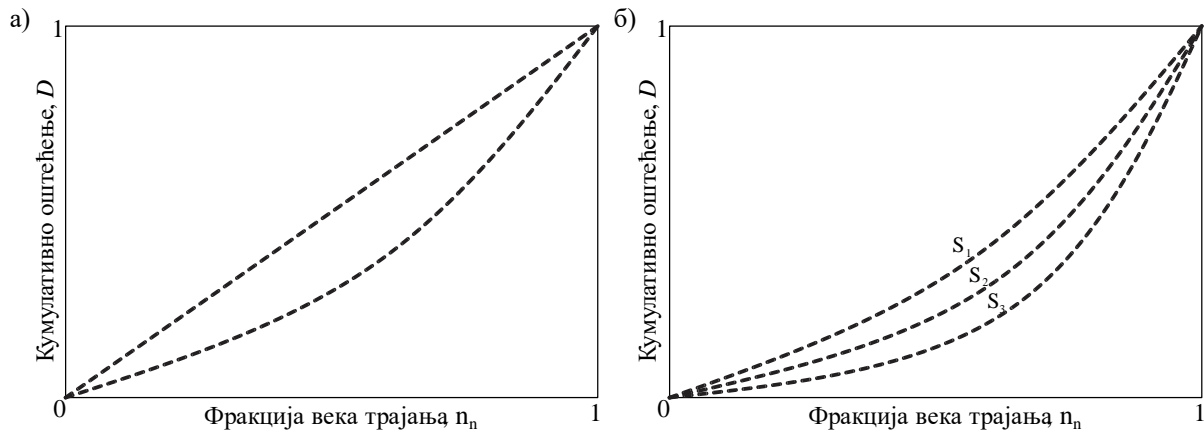
Најважнији аспект предвиђања понашања адхезионих спојева у току експлоатационог века, представља могућност узимања у обзир утицаја реалног спектра оптерећења [91]. Међутим, истраживања која су до сада спроведена у области замора адхезионих спојева углавном су обухватила циклично оптерећење константне амплитуде. У веома малом броју радова су објављена истраживања спроведена на адхезионим спојевима под дејством променљивог цикличног оптерећења [91,133–135]. Од наведених истраживања, само су [91] и [135] усмерена на предвиђање века трајања спојева, што је заправо суштина анализе замора. У овим радовима је показано да се у ту сврху могу користити модели који су у пракси устаљени за предвиђање века трајања других врста спојева и материјала, као што су композити и метали. Најчешће коришћени модели, доступни у литератури, базирани су на принципима кумулативног оштећења и преостале чврстоће.

5.3.1 Принцип кумулативног оштећења

Основна претпоставка овог принципа је да услед дејства цикличног оптерећења долази до акумулације оштећења, пропорционално броју циклуса, што води до лома споја. Оштећење се мери бездимензионалним параметром, који је повезан је са процентом животног века који је „искоришћен“ до посматраног тренутка. Овај параметар је у литератури најчешће означен словом D (damage). У случају неоптерећеног узорка његова вредност је 0, и повећава се са порастом броја циклуса. У тренутку лома вредност параметра оштећења је $D=1$.

Модели базирани на принципу кумулативног оштећења спадају у најзаступљеније моделе за предвиђање века трајања при дејству променљивог цикличног оптерећења. На основу карактера промене оштећења са порастом броја циклуса, они се деле на [133]:

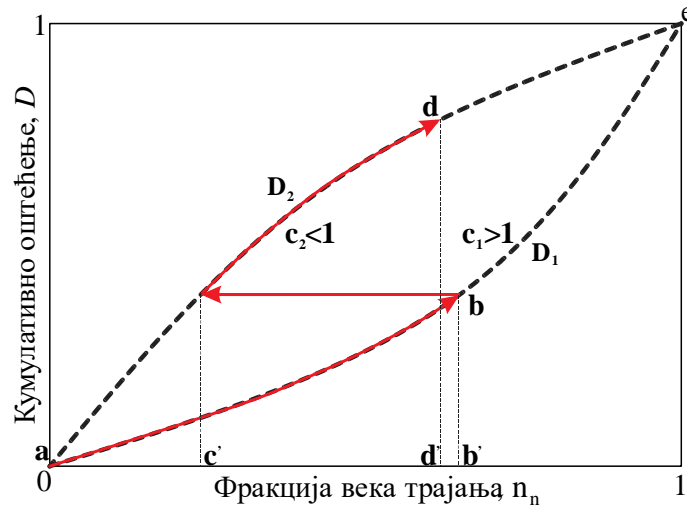
- 1) Линеарне, независне од нивоа оптерећења
- 2) Нелинеарне, независне од нивоа оптерећења
- 3) Нелинеарне, зависне од нивоа оптерећења



Слика 5.27 Модели кумулативног оштећења: а) независни од нивоа оптерећења
б) зависни од нивоа оптерећења; према [133]

На слици 5.27а илустровани су модели чији су параметри независни од нивоа оптерећења. Они подразумевају да ток оштећења зависи искључиво од фракције века трајања који је узорак „преживео“. Њихова линеарност, односно нелинеарност, се односи на развој оштећења у току века трајања. Линеарни модел подразумева константну брзину развоја оштећења, док у случају нелинеарног модела, илустрованог доњом линијом на слици 5.27а, она расте са порастом броја циклуса. Слика 5.27б приказује развој оштећења у моделима који су зависни од нивоа оптерећења. Ова зависност се односи на појаву да се ток промене брзине оштећења мења са променом нивоа оптерећења.

Дијаграми оштећења који су приказани на слици 5.27 односе се на константно циклично оптерећење. Међутим, с обзиром на то да ови модели изражавају оштећење као функцију фракције века трајања, за шта је неопходно одредити сам век трајања при одређеном нивоу оптерећења, принцип кумулативног оштећења је намењен искључиво предвиђању у случају променљивог цикличног оптерећења. Примена овог принципа за предвиђање века трајања адхезионих спојева под дејством променљивог цикличног оптерећења илустрована је на слици 5.28. Оштећење узорка који је изложен оптерећењу S_1 се развија по кривој D_1 све до тренутка промене нивоа оптерећења (тачка В). Након тога наставља да се развија по кривој D_2 , која одговара нивоу оптерећења S_2 , при чему почетна вредност оштећења овог сегмента (тачка С) представља крајњу вредност оштећења претходног сегмента. До лома долази у тренутку када укупно оштећење достигне вредност $D=1$.



Слика 5.28 Кумулативно оштећење при дејству променљивог цикличног оптерећења

Најстарији модел који припада овој групи, а уједно и најзаступљенији модел у литератури је Палмгрен-Минеров (Palmgren-Miner) модел [136]. Њиме се оштећење које је акумулирано након n_i циклуса i -тог нивоа оптерећења константне амплитуде представља као фракција века трајања која одговара датом броју циклуса, а укупно оштећење се израчунава коришћењем израза:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (5.53)$$

Овај модел спада у групу линеарних и независних од нивоа оптерећења, и представља најједноставнији модел у доступној литератури. За његову употребу је довољно одредити $S-N$ криву или, у случају спектра оптерећења који садржи циклусе различитог степена асиметрије, дијаграм константног века трајања. Међутим, различита експериментална истраживања су показала да се његовом применом могу добити нетачна, често и врло неконзервативна решења [126]. Упркос тој чињеници, до данас је у инжењерској пракси остао најзаступљенији модел за предвиђање века трајања конструкција и основа за оцену великог броја савремених истраживања у овој области [137–139].

Један од најпознатијих нелинеарних модела је модификовани Палмгрен-Минеров модел [140] којим се оштећење представља следећом једначином:

$$D = \sum_i \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^c \quad (5.54)$$

У једначини (5.54) c је константа којом се одређује да ли се развој оштећења у току времена убрзава или успорава. Уколико је $c < 1$ са порастом броја циклуса долази до успоравања развоја оштећења (слика 5.28, крива a-c-d-e) што се најчешће може приметити у случају металних конструкција [141–143]. Коефицијент $c > 1$ обухвата случајеве у којима долази до убрзавања развоја оштећења у току времена (слика 5.28, крива a-b-e), што је најчешћи случај код адхезионих спојева [133–135,144]. Марко и Старки (Marco & Starkey) [145] су закључили да је константа c зависна од нивоа оптерећења и степена асиметрије циклуса. Према њиховом предлогу, израз за оштећење у i -том нивоу оптерећења има следећи облик:

$$D_i = \left(\frac{n_i + n_{ekv,i-1}}{N_i} \right)^{c_i} \quad (5.55)$$

где је n_i број циклуса оптерећења i -тог блока, $n_{ekv,i-1}$ еквивалентан број циклуса нивоа оптерећења i -тог блока, односно број циклуса који даје исто оштећење као n_{i-1} циклус ($i-1$)-ог блока, који се изражава једначином:

$$n_{ekv,i-1} = N_i (D_{i-1})^{1/c_i} \quad (5.56)$$

Анализирајући слике 5.27а и 5.28, може се регистровати суштинска разлика између модела независних и зависних од нивоа оптерећења. Заправо, са слике 5.27а је јасно сви модели који су независни од нивоа оптерећења, било линеарни или нелинеарни, предвиђају исти век трајања. Разлог за то лежи у чињеници да, с обзиром на то да иста крива служи за описивање свих нивоа оптерећења, при преласку на сваки наредни ниво, еквивалентни број циклуса је једнак укупном броју циклуса претходног

нивоа. У складу са тим важи да је $\sum_i \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^c = \left(\sum_i \frac{n_i}{N_i} \right)^c$, односно да до лома долази у

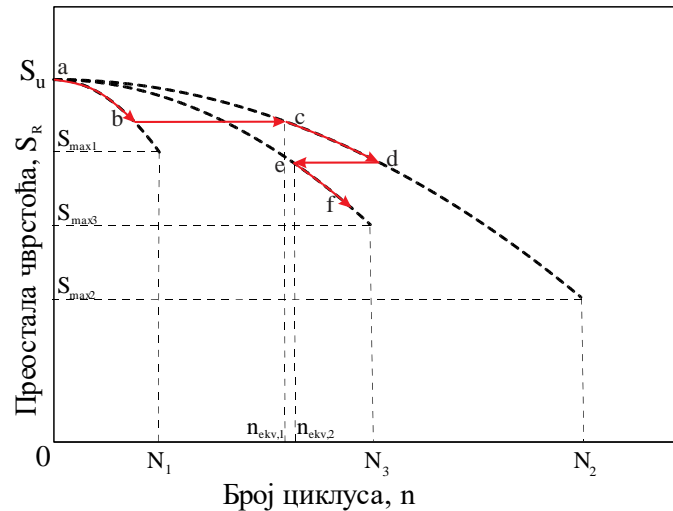
тренутку када је $\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$, без обзира на вредност експонента.

Са друге стране, за случај приказан на слици 5.28, иако се може приметити да је збир фракција века трајања два блока оптерећења $\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2}$ већи од 1, до лома је преостало још више од трећине века трајања другог нивоа оптерећења. Међутим, у случају да је редослед нивоа оптерећења обрнут, до лома би дошло пре него што збир

фракција века трајања два нивоа оптерећења достигне вредност 1. У литератури се ова појава често означава као утицај распореда секвенци оптерећења на предвиђање века трајања конструкција (енгл. sequencing effect).

5.3.2 Преостала чврстоћа при дејству оптерећења променљиве амплитуде

У случају променљивог цикличног оптерећења, филозофија овог принципа има значајну предност у односу на принцип кумулативног оштећења, у највећој мери због чињенице да је услов лома изражен односом величине силе која делује на конструкцију и преостале чврстоће [126]. На слици 5.29 је илустрован ток промене преостале чврстоће на примеру променљивог цикличног оптерећења које се састоји од три блока различитих нивоа оптерећења, при чему је $S_{\max 1} > S_{\max 3} > S_{\max 2}$. Чврстоћа узорка ће се током деловања првог блока оптерећења мењати по кривој *a-b*. Након преласка на други ниво оптерећења, промена чврстоће ће тећи по кривој *c-d*. Тачка *c* се налази на кривој преостале чврстоће другог нивоа оптерећења, и означава исту величину преостале чврстоће коју је узорак имао на крају првог блока оптерећења. Преласком на трећи блок, чврстоћа наставља деградацију по кривој *e-f*. Лом наступа у тренутку када преостала чврстоћа достигне вредност максималне силе тренутног нивоа оптерећења. Линије *b-c* и *d-e* представљају транзицију из вишег у нижи и нижег у виши ниво оптерећења, респективно. Из слике 5.29 се јасно може закључити да би посматрани узорак могао издржати још одређени број циклуса другог или трећег нивоа оптерећења, док би промена на први ниво оптерећења довела до његовог лома. Такође, у случају промене распореда блокова, уз задржавање истих бројева циклуса, јасно се види да би при распореду оптерећења $S_2 - S_3 - S_1$ дошло до лома и пре излагања узорка предвиђеном броју циклуса последњег блока. Тако, очигледно је да се применом принципа преостале чврстоће на случајеве променљивог цикличног оптерећења узима у обзир утицај распореда секвенци на век трајања конструкције. Иако је пример илустрован нелинеарном деградацијом чврстоће, јасно је да се овај феномен узима у обзир и при деградацији означеној линеарним моделима, што је још једна битна разлика између принципа преостале чврстоће и кумулативног оштећења. Детаљна анализа примене модела преостале чврстоће за предвиђање века трајања адхезионих спојева под дејством променљивог цикличног оптерећења дата је у [91,146].



Слика 5.29 Принцип преостале чврстоће за променљиво циклично оптерећење

Применивши горе илустровани приступ, сваки од модела преостале чврстоће при константном цикличном оптерећењу је могуће применити за предвиђање века трајања конструкција при дејству променљивог цикличног оптерећења. Да би се то остварило, уведен је појам еквивалентног броја циклуса, по истом принципу као у поглављу 5.3.1. Линеарни модел Браутмана и Сахуа (једначина (5.39)), примењен на променљиво циклично оптерећење има следећи облик:

$$S_{R,i} = S_u - (S_u - S_{\max,i}) \cdot \left(\frac{n_{\text{ekv},i-1} + n_i}{N_i} \right), \quad (5.57)$$

где је $S_{R,i}$ преостала чврстоћа након n_i циклуса i -тог нивоа оптерећења, а $n_{\text{ekv},i-1}$ број циклуса i -тог нивоа оптерећења који резултује истом преосталом чврстоћом као на крају $(i-1)$ -ог нивоа оптерећења. Еквивалентни број циклуса модела Браутмана и Сахуа се у случају оптерећења које се састоји од два нивоа може одредити следећом једначином:

$$n_{\text{ekv},1} = \frac{S_u - S_{\max 1}}{S_u - S_{\max 2}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot n_1. \quad (5.58)$$

Рачунајући постепено, секвенцу по секвенцу, помоћу једначина (5.57) и (5.58) се може извести израз за преосталу чврстоћу након i -тог нивоа оптерећења:

$$S_{R,i} = S_u - \sum_{j=1}^i (S_u - S_{\max j}) \frac{n_j}{N_j}. \quad (5.59)$$

Шаф и Дејвидсон [124,147] су при развоју пробабилистичког модела за променљиво циклично оптерећење користили модел дат једначином (5.40) који, написан за променљиво циклично оптерећење гласи:

$$S_{R,i} = S_u - (S_u - S_{\max,i}) \cdot \left(\frac{n_{ekv,i-1} + n_i}{N_i} \right)^{\alpha_i}, \quad (5.60)$$

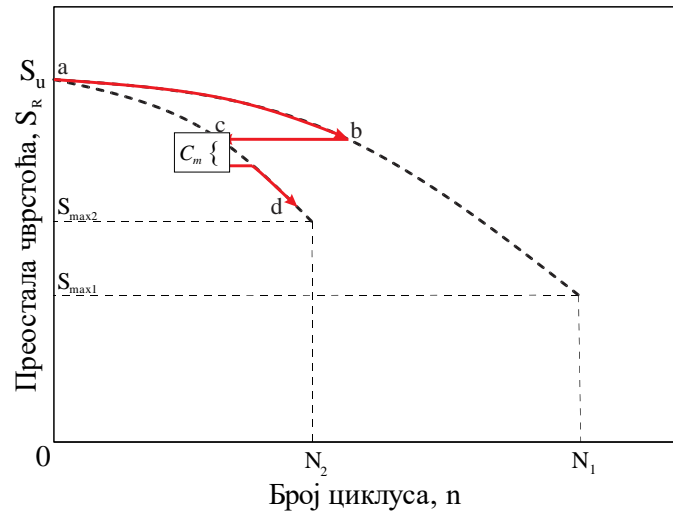
при чему је

$$n_{ekv,i-1} = \left(\frac{S_u - S_{R,i-1}}{S_u - S_{R,i}} \right)^{1/\alpha_i} N_i. \quad (5.61)$$

Тачност предвиђања века трајања конструкција под дејством променљивог цикличног оптерећења, применом наведених модела, у великој мери зависи од тачности процене спектра оптерећења. Као што је у овом поглављу већ напоменуто, распоред секвенци оптерећења може значајно утицати на век трајања, што се применом модела преостале чврстоће узима у обзир при његовом предвиђању. Међутим, постоје и друге појаве које утичу на деградацију чврстоће, и које могу бити накнадно имплементирани у поменуте моделе, као што је утицај учесталости промене нивоа оптерећења. О овом феномену ће више речи бити у наредном поглављу.

5.3.3 Утицај учесталости промене нивоа оптерећења на век трајања – „*cycle mix*“ ефекат

Фароу (Farrow) је у [148] закључио да се век трајања композитних ламината значајно смањује уколико је учесталост промене нивоа оптерећења већа. Ову појаву је назвао „*cycle-mix*“ ефекат. Шаф и Дејвидсон су на основу овог запажања предложили да се се у израз за одређивање преостале чврстоће на почетку нове секвенце оптерећења уведе корекциони члан, који су назвали „*cycle mix*“ фактор [124]. Касније је овај приступ примењен и за предвиђање века трајања адхезионих спојева [91,133]. Примена *cycle mix* фактора је приказана на слици 5.30. Након завршетка једне секвенце и промене нивоа оптерећења, преостала чврстоћа се додатно умањује за вредност *cycle mix* фактора (C_m). Ова редукција се примењује на транзицији између две секвенце оптерећења само у случају промене величине средње силе.



Слика 5.30 Примена *cycle mix* фактора

Прву формулацију *cycle mix* фактора, коју су, како је већ напоменуто, предложили Шаф и Дејвидсон [124], дата је једначином:

$$C_m = c_m S_u \left(\frac{\Delta S_m}{S_R} \right)^{(\Delta S_{\max} / \Delta S_m)^2}, \quad (5.62)$$

где је c_m константа која се одређује на основу експерименталних резултата, ΔS_m промена средње силе, ΔS_{\max} промена максималне силе а S_R преостала чврстоћа у тренутку транзиције. Они су закључили да би редукцију требало вршити само у случају пораста средње силе. Такође, приметили су да у случају дужина секвенци оптерећења већа од 0,1% века трајања утицај *cycle mix* ефекта је скоро занемарљив.

Ерполат је, испитујући понашање адхезионих спојева композитних материјала при дејству променљивог цикличног оптерећења, предложио другачији израз за рачунање *cycle mix* фактора [133]:

$$C_m = \alpha (\Delta S_m)^{\beta \Delta S_{\max} (\Delta S_{\max} / \Delta S_m)}, \quad (5.63)$$

где су α и β коефицијенти који се одређују на основу експерименталних резултата, упоређивањем векова трајања за различите спектре оптерећења. У овом истраживању, преостала чврстоћа је, такође, редукована само у случају скока средње силе.

За разлику од прва два случаја, Шеној је, испитујући адхезионе спојеве алуминијумских адхерената [91], закључио да би преосталу чврстоћу требало рефуквати искључиво у случају пада средње силе. Овај закључак је у складу и са резултатима испитивања века трајања адхезионих спојева адхерената од нерђајућег

челика, објављених у [135]. Поред тога, он је предложио једначину *cycle mix* фактора са променљивим коефицијентом α :

$$C_m = \left(\frac{\zeta}{d} + \alpha \right) (\Delta S_m)^{\beta \Delta S_{\max} (\Delta S_{\max} / \Delta S_m)^\gamma}, \quad (5.64)$$

где је d дужина споја, ζ дужина макро-прелине а α , β и γ коефицијенти који се одређују на основу експерименталних података.

Оно што представља ограничавајући фактор за примену *cycle mix* фактора је неопходност додатних експерименталних резултата под дејством променљивог цикличног оптерећења.

5.3.4 Предлог методе предвиђања века трајања под променљивим цикличним оптерећењем применом модела НРЧ

Аналогно примени принципа резерве чврстоће за предвиђање века трајања адхезионих спојева под дејством променљивог цикличног оптерећења, у ову сврху је могуће употребити и предложени модел НРЧ. У овом поглављу ће бити развијене једначине за предвиђање вредности НРЧ након два блока константног цикличног оптерећења. Прорачун ове вредности за три и више блокова оптерећења се ради истим поступком, с тим што се, при преласку на i -ти блок, прорачун спроводи као да је целокупно оштећење генерисано у претходном ($i-1$) блоку оптерећења.

Променљиво циклично оптерећење које се састоји од два блока дефинисано је бројевима циклуса (n_1, n_2), нивоима оптерећења израженим преко максималних сила ($S_{\max 1}, S_{\max 2}$) и веком трајања који одговара датим нивоима оптерећења (N_1, N_2). У овом случају се подразумева да исти параметри модела одговарају свим нивоима оптерећења. Нормализована резерва чврстоће на крају првог циклуса једнака је:

$$S_{res,1,n} = \left(1 - n_{n,1}^\alpha \right)^\beta. \quad (5.65)$$

Да би узорак примио оптерећење другог блока мора испунити услов да је $S_{res,1,n} > 0$. У супротном би узорак доживео лом већ у првом блоку оптерећења. Преостала чврстоћа која одговара $S_{res,1,n}$ је изражена следећом једначином:



$$S_{R,1}(n_1) = S_{\max,1} + (S_u - S_{\max,1}) \cdot S_{res,1,n} = S_{\max,1} + (S_u - S_{\max,1}) \cdot (1 - n_{n,1}^\alpha)^\beta, \quad (5.66)$$

при чему је она једнака вредности и преостале чврстоће на почетку другог блока оптерећења. Тако би израз за резерву чврстоће на почетку другог блока оптерећења гласио

$$S'_{res,2} = S_{R,1}(n_1) - S_{\max,2}. \quad (5.67)$$

Убацавањем једначине (5.66) у (5.67) добија се

$$S'_{res,2} = S_{\max,1} + (S_u - S_{\max,1}) \cdot S_{res,1,n} - S_{\max,2}. \quad (5.68)$$

Уз елементарне математичке трансформације се може показати да је

$$S'_{res,2}(n_1) = (S_{res,1,n} - 1) \cdot (S_u - S_{\max,1}) + S_u - S_{\max,2}. \quad (5.69)$$

Дељењем резерве чврстоће на почетку другог блока са $(S_u - S_{\max,2})$ добијамо НРЧ на почетку другог блока оптерећења:

$$S'_{res,2,n}(n_1) = 1 - (1 - S_{res,1,n}) \left(\frac{S_u - S_{\max,1}}{S_u - S_{\max,2}} \right) \quad (5.70)$$

У следећем кораку неопходно је изразити еквивалентни број циклуса. Он се може одредити пошавши од срачунате вредности НРЧ на почетку другог блока:

$$S'_{res,2,n} = \left(1 - \left(\frac{n_{ekv,1}}{N_2} \right)^\alpha \right)^\beta, \quad (5.71)$$

одакле се може изразити нормализовани еквивалентни број циклуса

$$n_{ekv,1,n} = \frac{n_{ekv,1}}{N_2} = \left(1 - S'_{res,2,n} \frac{1}{\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (5.72)$$

Тако, израз за одређивање еквивалентног броја циклуса на почетку другог блока оптерећења гласи:

$$n_{ekv,1} = N_2 \cdot \left(1 - S'_{res,2,n} \frac{1}{\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (5.73)$$

За израчунавање НРЧ на крају другог блока оптерећења неопходно је одредити укупни број циклуса

$$n_{tot,2} = n_{ekv,1} + n_2, \quad (5.74)$$

Израз за израчунавање НРЧ након n_1 циклуса првог и n_2 циклуса другог блока оптерећења има следећи облик:

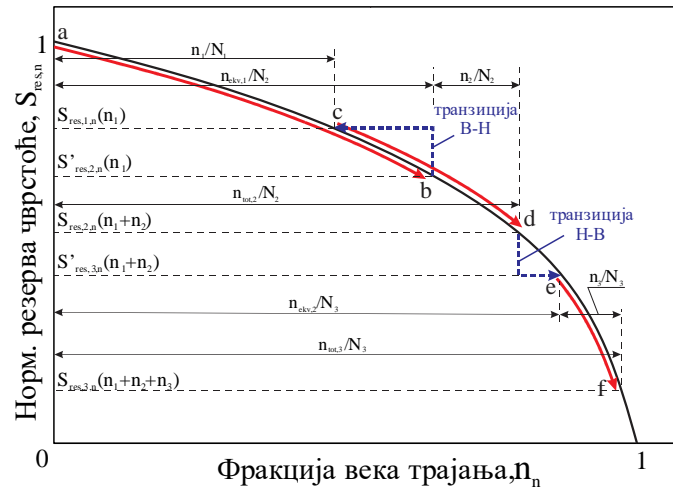
$$S_{res,2,n} \left(n_1^{(S_1)} + n_2^{(S_2)} \right) = \left(1 - \left(\frac{n_{tot,2}}{N_2} \right)^\alpha \right)^\beta \quad (5.75)$$

Убацавањем једначина (5.65), (5.70), (5.73) и (5.74) у једначину (5.75) добија се једначина за одређивање НРЧ након два блока оптерећења.

$$S_{res,2,n} \left(n_1 + n_2 \right) = \left(1 - \left[\left(1 - \left(1 - \left(1 - \left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right)^\alpha \right)^\beta \right) \frac{(S_u - S_{max,1})}{(S_u - S_{max,2})} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right]^{\frac{1}{\alpha}} + \frac{n_2}{N_2} \right)^\alpha \quad (5.76)$$

Једначином (5.76) се може одредити НРЧ након деловања два блока оптерећења. Међутим, мишљење аутора је да овај приступ пружа веће могућности уколико се употреби за предвиђање века трајања уз употребу компјутера. Једначине (5.65), (5.70) и (5.73)-(5.75) представљају кораке алгоритма за прорачунавање НРЧ на крају сваког блока оптерећења. Међутим, јасно је да ће се у тим корацима морали имплементирати одређени услови којима би било испитано да ли се предвиђа лом при преласку на сваки следећи ниво оптерећења. Тако, осим већ поменутог услова којим се испитује да ли је узорак доживео лом у првом блоку оптерећења, мора се испитати и следеће:

- 1) Да ли се превиђа лом у првом циклусу наредног (i -тог) блока оптерећења, што се дешава уколико је испуњен услов $S_{res,i-1,n} > 0$, али не и $S'_{res,i,n} > 0$. Тада је преостала чврстоћа која одговара НРЧ након завршетка ($i-1$)-тог блока мања или једнака максималној сили i -тог оптерећења.
- 2) Да ли се предвиђа лом у току наредног (i -тог) блока оптерећења, што се дешава уколико је испуњен услов $S'_{res,i,n} > 0$, али не и $n_{i,tot} = n_{ekv,i-1} + n_i < N_i$. У том случају ће се предвидети лом након $N_i - n_{ekv,i-1}$ циклуса i -тог блока оптерећења.



Слика 5.31 Примена принципа нормализоване резерве чврстоће у случају променљивог цикличног оптерећења

Примена принципа НРЧ, изражена једначинама (5.65)-(5.75) је илустрована на слици 5.31. Принцип је примењен на исти случај који је илустрован на слици 5.29. Након n_1 циклуса првог нивоа оптерећења НРЧ је смањена у односу на почетну вредност, тако да одговара тачки b . Прелазак са тачке b на c представља промену вредности НРЧ при преласку са вишег на нижи ниво оптерећења (В-Н), дату једначином (5.70). Апсциса тачке c одговара еквивалентном броју циклуса при преласку на наредни ниво оптерећења, док ордината одговара почетној вредности НРЧ у првом циклусу другог нивоа оптерећења. На крају другог блока оптерећења, НРЧ одговара тачки d на дијаграму. Апсциса тачке d представља укупан број циклуса ($n_{tot,2}$) који би био потребан да се узорак доведе до истог нивоа оштећења деловањем оптерећења једнаког оптерећењу другог блока. Прелазак са тачке d на e представља промену НРЧ при преласку са нижег на виши ниво оптерећења (Н-В). У таквом случају, једначином (5.70) је могуће добити негативну вредност НРЧ (или једнаку 0), што значи да ће доћи до лома при првом циклусу трећег нивоа оптерећења. Цео поступак се понавља до тренутка за који се предвиђа наступање лома.

Као и у случају примене принципа преостале чврстоће, предложени поступак може у обзир узети и *cycle mix* ефекат. У том случају се, при транзицији на сваки наредни ниво оптерећења, уместо једначине (5.70) користи следећи израз

$$S'_{res,2,n}(n_1) = 1 - \left(1 - S_{res,1,n} + \frac{CM}{S_u - S_{max,1}} \right) \left(\frac{S_u - S_{max,1}}{S_u - S_{max,2}} \right). \quad (5.77)$$

6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ И МОДЕЛОВАЊЕ АДХЕЗИОНИХ СПОЈЕВА ПОД ДЕЈСТВОМ ЦИКЛИЧНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

Експериментално испитивање адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења је, као и у случају статичког оптерећења, спроведено на узорцима фасадног споја трапезастог лима и двоструког преклопног споја, описаних у поглављима 4.1 и 4.2. Циљ испитивања је био да се истражи понашање ових типова спојева под дејством цикличног оптерећења и обави валидација модела предложених у претходном поглављу. Ради одређивања S-N кривих и дефинисања законитости промене механичких својстава са порастом броја циклуса оптерећења, експериментално је испитан век трајања спојева при различитим нивоима оптерећења, као и преостала чврстоћа након парцијалног замора. Поред тога, приликом испитивања века трајања узорака под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде, праћена је и промена њиховог деформацијског одговора са порастом броја циклуса.

6.1 Испитивање фасадних спојева

Испитивање понашања фасадних спојева под дејством цикличног оптерећења је подељено на два сегмента. У првом сегменту узорци су излагани константном цикличном оптерећењу до тренутка лома. Испитивање је спроведено при различитим нивоима оптерећења, мањим од средње вредности статичке чврстоће. Након тога су, применом метода приказаних у поглављу 5.2, одређене S-N криве. Други део се односи на испитивање преостале чврстоће након излагања узорака одређеном броју циклуса оптерећења, који представља сегмент века трајања, предвиђеног S-N кривом.

6.1.1 Испитивање излагањем цикличном оптерећењем до лома

Век трајања

Испитивање фасадних спојева излагањем цикличном оптерећењу до лома је спроведено на узорцима чија су геометрија и поступак израде приказани у поглављу 4.5. Узорци су испитани на серво-хидрауличној универзалној кидалици MTS 810 (слика 6.1), максималног опсега силе 100kN. С обзиром да није постојала могућност

причвршћивања узорака за конструкцију кидалице, за наношење оптерећења је употребљена специјална конструкција, приказана на слици 6.2. Снимање сигнала је вршено помоћу вишеканалног мерно-аквизиционог система Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) MGCplus (слика 6.3), са уграђеним модулима ML01B и ML55B.



Слика 6.1 Универзална серво-хидраулична кидалица MTS 810



Слика 6.2 Диспозиција при испитивању фасадног споја под дејством цикличног оптерећења



Слика 6.3 Систем за аквизицију података HBM MGCplus

Оптерећивање узорака је спроведено наношењем силе променљивог интензитета у облику синусне функције константне амплитуде, са фреквенцијом $f=5\text{Hz}$ и степеном асиметрије циклуса $R=0,1$. Одабране вредности фреквенције и степена асиметрије циклуса представљају најчешће коришћене вредности ових параметара у истраживањима која се могу наћи у доступној литератури [149,150]. Поред тога, важно је напоменути да фреквенција од 5Hz омогућава довољно брзо спровођење испитивања, при томе не доводећи до повећања температуре узорака. Приликом



испитивања је бележен број циклуса у тренутку лома узорка. У случајевима узорка који су „преживели“ 2×10^6 циклуса, испитивање је прекинуто, а ниво оптерећења се сматрао мањим или једнаким динамичкој чврстоћи испитаног узорка.

Испитане су две групе узорка, за чије су спајање коришћени адхезиви Lord 410GB и Kōrapur 842. Основни подаци о параметрима испитивања појединачних узорка, као и број нанетих циклуса оптерећења сумирани су у табелама 6.1 и 6.2.

Табела 6.1 Испитивање века трајања узорка фасадног споја – Lord 410GB

Бр.	S_{max} [kN]	S_{min} [kN]	S_a [kN]	S_m [kN]	лом узорка	f [Hz]	R	N
1.	4,92	0,492	4,428	2,706	да	5	0,1	219
2.	4,10	0,410	3,690	2,255				71
3.	3,28	0,328	2,952	1,804				5902
4.	3,28	0,328	2,952	1,804				6362
5.	3,28	0,328	2,952	1,804				6795
6.	2,50	0,250	2,250	1,375				166224
7.	2,50	0,250	2,250	1,375				102682
8.	2,50	0,250	2,250	1,375				18600

Табела 6.2 Испитивање века трајања узорка фасадног споја – Kōrapur 842

Бр.	S_{max} [kN]	S_{min} [kN]	S_a [kN]	S_m [kN]	лом узорка	f [Hz]	R	N
1.	3,28	0,328	1,476	1,804	да	5	0,1	87
2.	3,28	0,328	1,476	1,804	да			253
3.	3,28	0,328	1,476	1,804	да			1306
4.	2,50	0,250	1,125	1,375	да			1716
5.	2,50	0,250	1,125	1,375	да			3456
6.	2,50	0,250	1,125	1,375	да			4602
7.	1,64	0,164	0,738	0,902	да			70894
8.	1,64	0,164	0,738	0,902	да			121443
9.	1,64	0,164	0,738	0,902	да			162375
10.	0,82	0,082	0,369	0,451	не			2000000

На основу резултата испитивања одређене су S-N криве. Ради поређења предвиђања и адекватнијег одабира бројева циклуса које представљају сегменте века трајања при испитивању преостале чврстоће, одређено је више кривих применом следећих модела и метода за одређивање њихових параметара:

- 1) Модел линеарне за зависности силе и логаритма века трајања (једначина (5.2)), применом регресионе анализе.
- 2) Модел линеарне зависности логаритма силе и логаритма века трајања (једначина (5.3)), применом регресионе анализе.
- 3) Сендецкијев модел (једначина (5.8)), применом поменутог MATLAB кода написаног према алгоритму приказаном на слици 5.9
- 4) Модел линеарне зависности логаритма силе и логаритма века трајања (једначина (5.17)), применом MATLAB кода написаног према алгоритму приказаном на слици 5.8

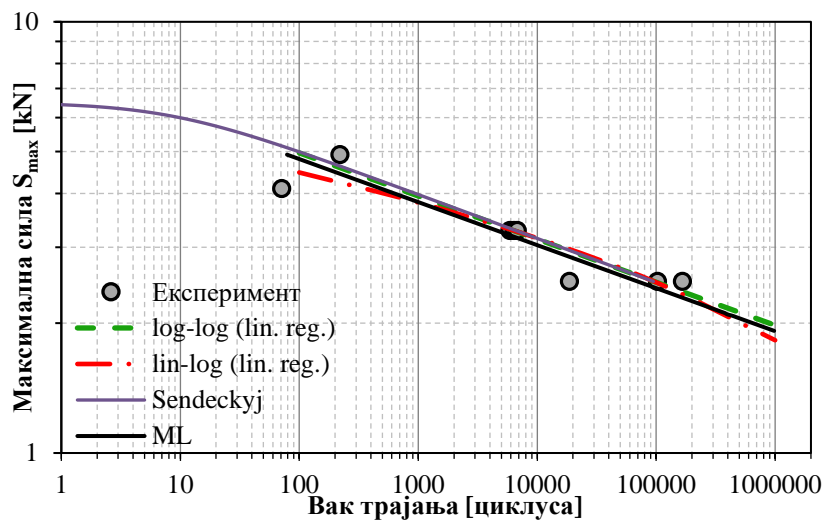
Срачунати параметри математичких модела S-N кривих и њима предвиђене динамичке чврстоће су приказане у табели 6.3. Поређење различитих S-N дијаграма, за спојеве израђене помоћу адхезива Lord 410GB и Kōrapur 842, приказано је на сликама 6.4 и 6.5, респективно.

Табела 6.3 Параметри S-N кривих – фасадни спојеви

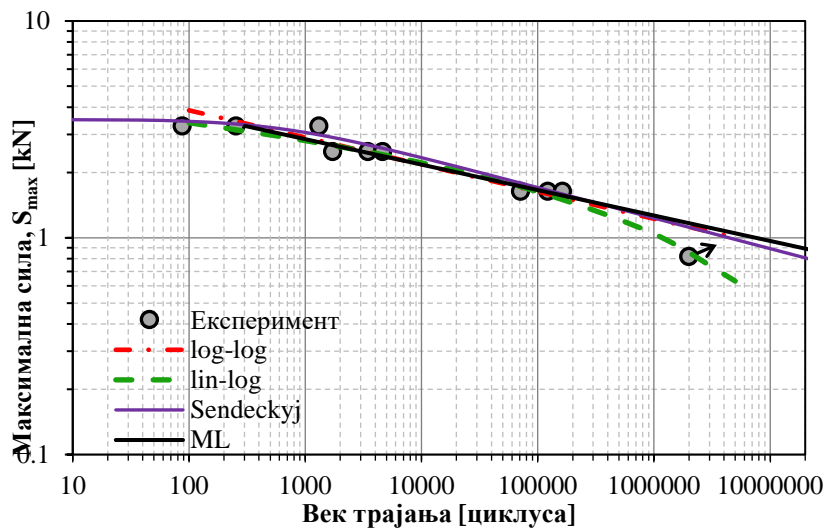
Адхезив	Модел	Једначина	Параметар 1	Параметар 2	S _a [kN]
Lord 410 GB	лин. – лог.	(5.2)	$a = 8.76058$	$b = -1.51164$	1,627
	лог. – лог.	(5.3)	$a = 8.96281$	$b = -10.00474$	1,845
	Сендецкиј	(5.8)	$a = 0.04778$	$b = 0.10212$	1,838
	макс. вер.	(5.17)	-	$k = -10.01908$	1,804
Kōrapur 842	лин. – лог.	(5.2)	$a = 7.77272$	$b = -1.70102$	0,865
	лог. – лог.	(5.3)	$a = 6.70117$	$b = -7.99710$	1,122
	Сендецкиј	(5.8)	$a = 0.00109$	$b = 0.15222$	1,118
	макс. вер.	(5.17)	-	$k = -8.51651$	1,168

У случају адхезива Lord 410GB, при $N \geq 10^3$, нагиби S-N кривих свих модела који представљају линеарну зависност између $\log S$ и $\log N$ су готово идентични. Штавише, на делу кривих између 10^3 и 10^5 циклуса, предвиђања свих модела, укључујући и лин.-

лог. модел су, веома слична. При томе, у истој области, крива добијена применом методе максималне веродостојности је за нијансу конзервативнија од осталих. У области највиших и најнижих нивоа оптерећења најконзервативнија предвиђања даје лин.-лог. модел. Разлике између динамичких чврстоћа су у свим случајевима, осим код лин.-лог. модела, занемарљиве.



Слика 6.4 Поређење S-N кривих фасадних спојева – Lord 410GB

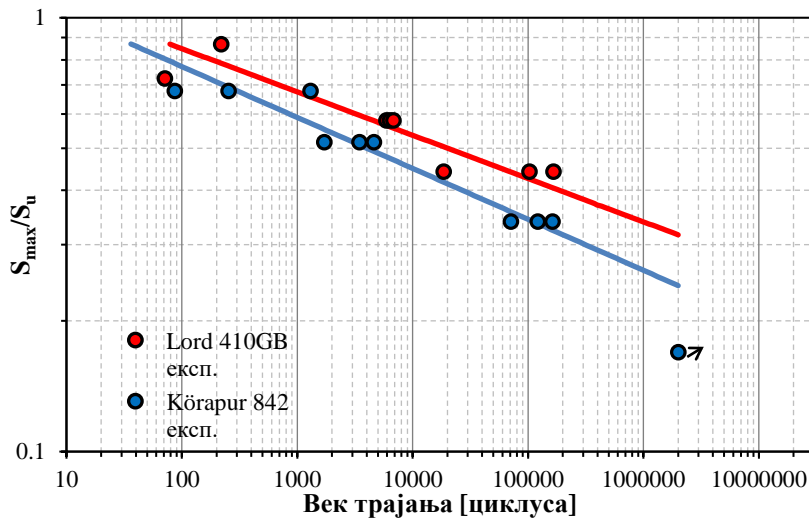


Слика 6.5 Поређење S-N кривих фасадних спојева – Kõrapur 842

У случају адхезива Kõrapur 842, постојање узорка који је „преживео“ 2 мил. циклуса проузроковало је разлику у нагибу S-N криве добијене методом максималне веродостојности у односу на остале моделе линеарне зависности $\log S$ и $\log N$. Метода максималне веродостојности је и у овом случају дала најконзервативнија предвиђања,

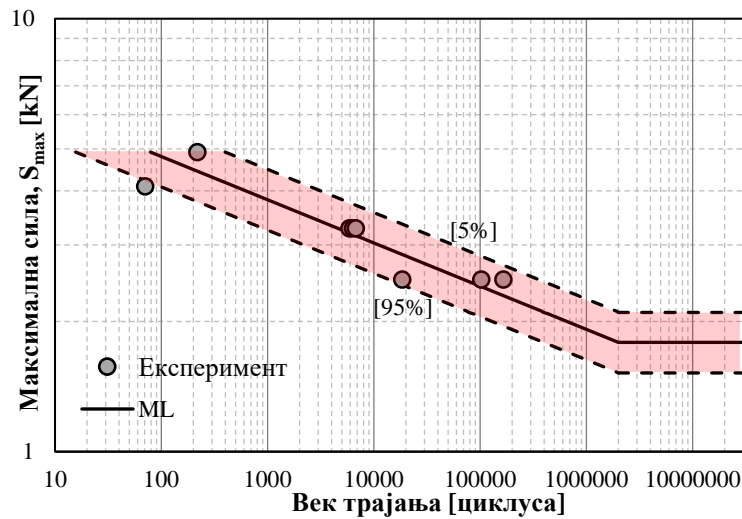
што је, заједно са чињеницом да се једино њоме могу узети у обзир и „преживели“ узорци, узроковало њен избор као референтне за даље анализе.

На слици 6.6 је приказано поређење нормализованих S-N кривих узорка спојених различитим адхезивима. Узорци израђени помоћу адхезива Lorda 410GB су при истим нивоима оптерећења издржавали знатно већи број циклуса у односу на узорке израђене помоћу адхезива Kögapur 842.

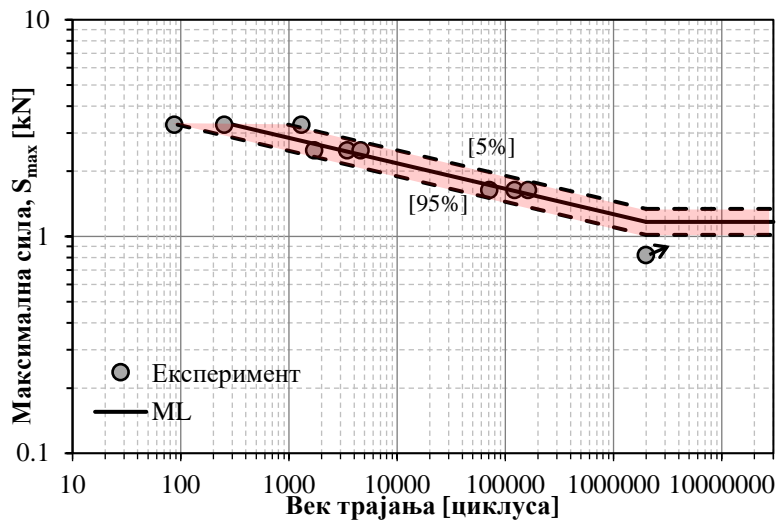


Слика 6.6 Поређење нормализованих S-N кривих фасадних спојева

Криве сликама 6.4-6.6 представљају број циклуса који одговара 50% вероватноће „преживљавања“ узорка при посматраном нивоу оптерећења, односно 63,2% у случају Сендецкијевог модела (Вејбулова расподела). Ради стицања увида у степен расипања експерименталних резултата, на сликама 6.7 и 6.8 су, за Lord 410GB и Kögapur 842 респективно, приказане криве које одговарају вероватноћи „преживљавања“ од 5% и 95% (интервал поверења од 90%)



Слика 6.7 Предвиђање века трајања фасадних спојева са интервалом поверења од 90% - Lord 410GB



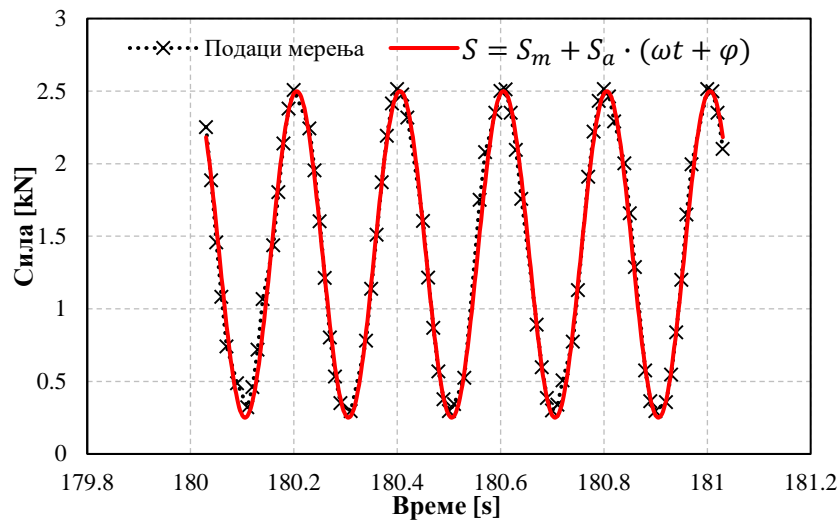
Слика 6.8 Предвиђање века трајања фасадних спојева са интервалом поверења од 90% - Kõgarup 842

Иако је употреба адхезива Lord 410GB дала знатно дужи век трајања, експериментални резултати ових узорка су показали веома висок степен расипања. То је узроковало много већи распон интервала поверења од 90% у односу на адхезив Kõgarup 842.

Деформацијски одговор узорка

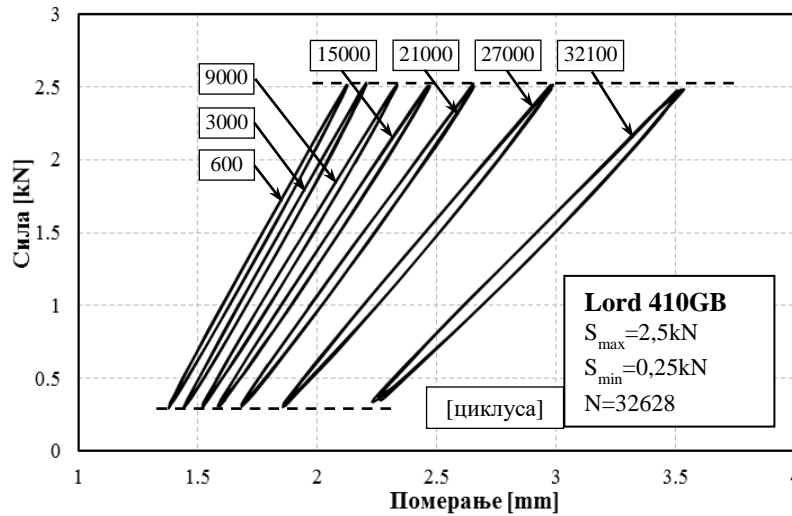
Приликом испитивања века трајања узорка, помоћу мерно-аквизиционог система је бележен ток силе и померања чељусту кидалице у времену. Резултати мерења су бележени у току једне секунде у интервалима од једног минута, при чему је учесталост узорковања била 80Hz. На тај начин, резултати мерења су садржали

податке о 5 од сваких 300 циклуса оптерећења, при чему је бележено 16 вредности по једном циклусу. На слици 6.9 је приказан сегмент излазног сигнала интензитета силе. Може се констатовати да је синхронизација узорковања и наношења оптерећења била таква да се њома није успевао у сваком циклусу регистровати тренутак достизања минималне и максималне вредности силе. Међутим, у највећем броју случајева, ове или њима приближне вредности су успешно регистроване у оквиру целог сегмента од 5 циклуса.



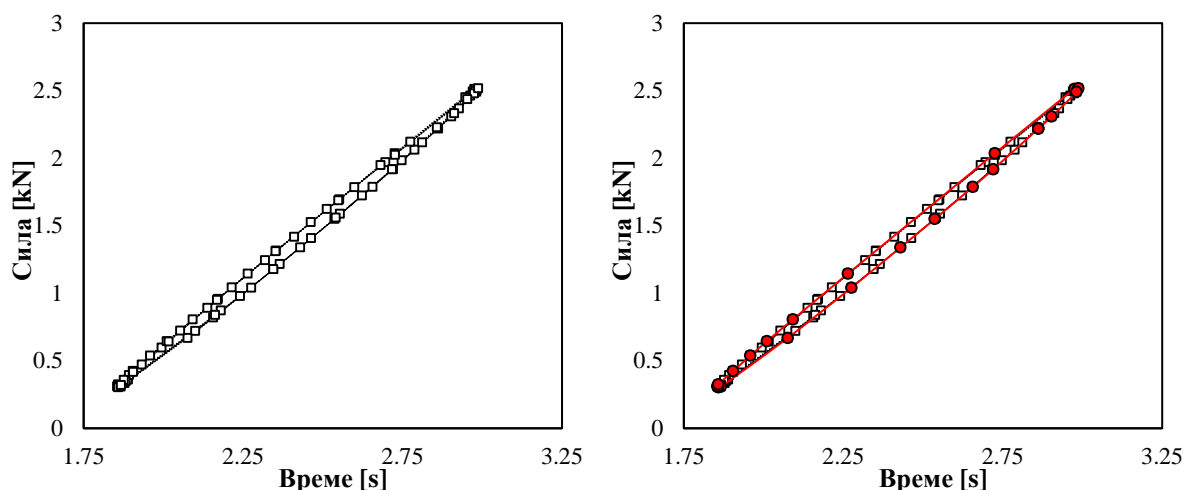
Слика 6.9 Излазни сигнал интензитета силе

Деформацијски одговор узорака при дејству константног цикличног оптерећења се може анализирати помоћу дијаграма сила-померање. На слици 6.10 је приказан типичан дијаграм зависности сила-померање испитаних узорака у различитим тренуцима деловања оптерећења (након различитог броја циклуса оптерећења). Јасно је уочљиво формирање хистерезисних петљи, чији се нагиб и површина мењају у току времена. Свака од приказаних хистерезисних петљи је конструисана помоћу података регистрованих у току сегмента од једне секунде, преклапајући 5 циклуса оптерећења. На тај начин је омогућено представљање комплетне хистерезисне петље између минималне и максималне вредности силе и одговарајућег померања. Важно је нагласити да је веома добро поклапање (колинеарност) циклуса у оквиру једне конструисање петље регистровано већ код узорака чији је век трајања нешто већи од хиљаду циклуса.

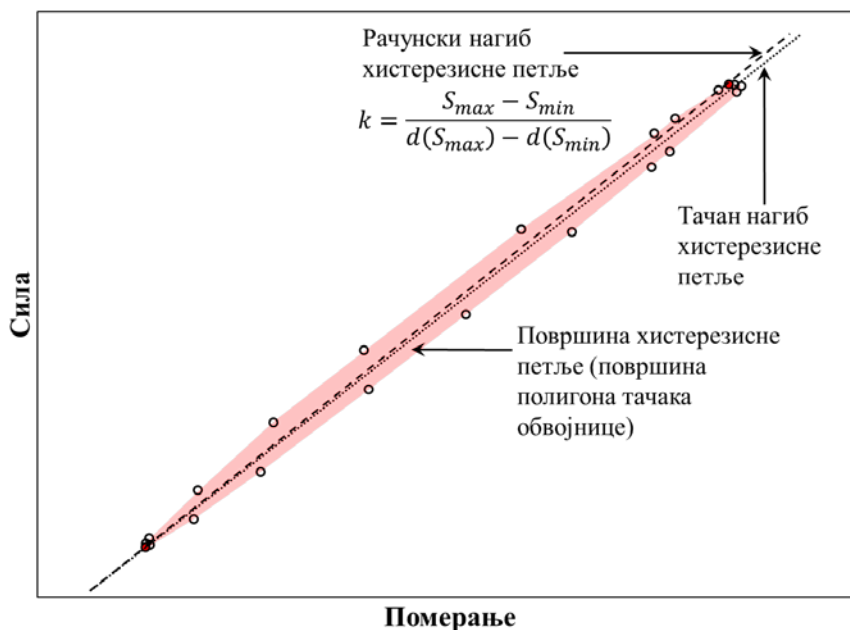


Слика 6.10 Пример деформацијског одговора узорка под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде

Према [151], за карактерисање промене крутости композита под дејством цикличног оптерећења препоручује се праћење промене хистерезиса, што је усвојено приликом израде ове дисертације. Нагиб петље једнак је крутости узорка у датом тренутку, док њена површина означава расипану енергију у оквиру једног циклуса оптерећења. У сврху анализе, развијен је посебан алгоритам за прорачун нагиба и површине хистерезисне петље за сваки сегмент од једне секунде током целог века трајања узорка. На основу развијеног алгоритма написан је MATLAB програм. Нагиб хистерезисне петље је рачунат као нагиб између двеју тачака које одговарају максималној и минималној регистрованој вредности силе, док је њена површина једнака површини полигона тачака криве. Ради омогућавања функционисања наредбе којом се прорачунава површина полигона, најпре је уведено поједностављење података сваког сегмента од једне секунде (слика 6.11) проналажењем тачака обвојнице експерименталних података, које су приказане црвеним маркерима на слици 6.11б.



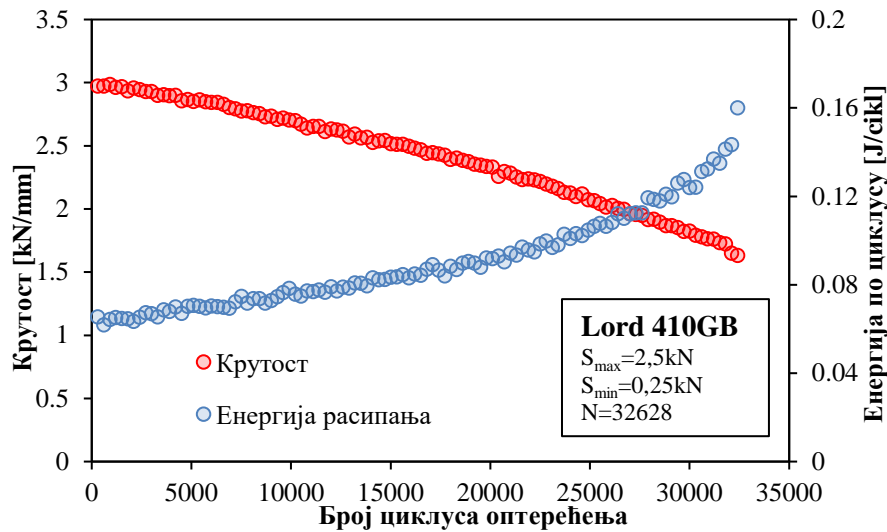
Слика 6.11 Пример поједностављења података у оквиру једног сегмента:
а)цео узорак; б)обвојница



Слика 6.12 Параметри деформацијског одговора

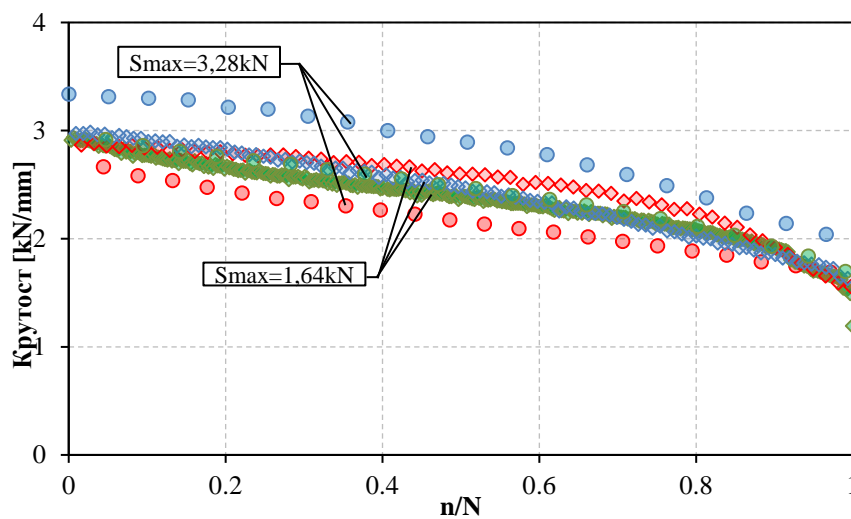
С обзиром да подаци у оквиру једног сегмента од 5 циклуса не морају садржати максималу и минималну силу цикличног оптерећења, може се јавити одређена разлика између прорачунске и тачне вредности нагиба (крутости), што је илустровано на слици 6.12. Ова разлика је минимална и може бити позитивна или негативна.

Помоћу MATLAB програма су срачунате вредности крутости и расипане енергије по циклусу оптерећења, за цео век трајања узорака. Типичан дијаграм промене ових вредности приказан је на слици 6.13.

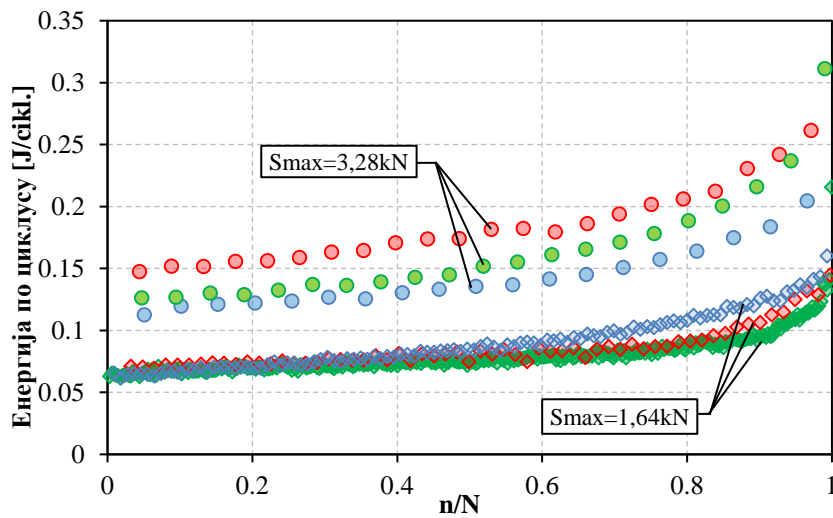


Слика 6.13 Пример дијаграма промене крутости и расипане енергије по циклусу оптерећења

Дијаграми промене крутости и расипане енергије по једном циклусу су срачунати за узорке приказане у табелама 6.1 и 6.2 и приказани на сликама 6.14 и 6.15, за адхезив Lord 410GB, и 6.16 и 6.17 за адхезив Kõrapur 842.

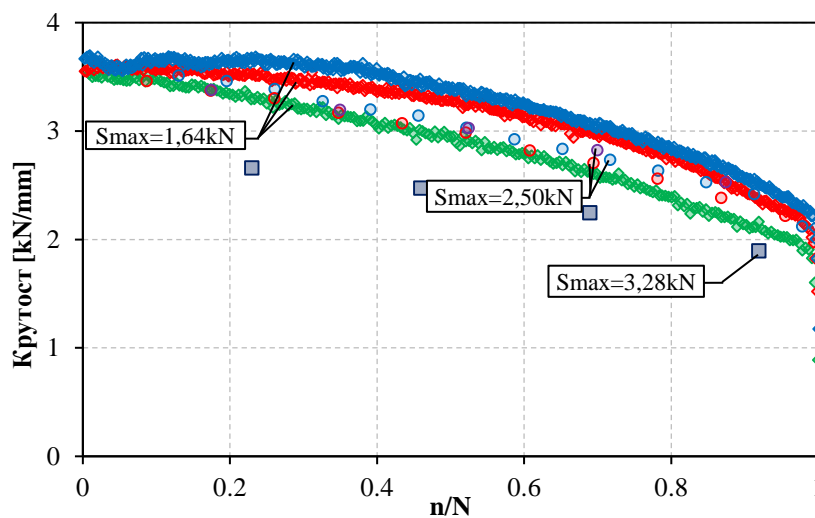


Слика 6.14 Дијаграм промене крутости порастом броја циклуса - Lord 410GB

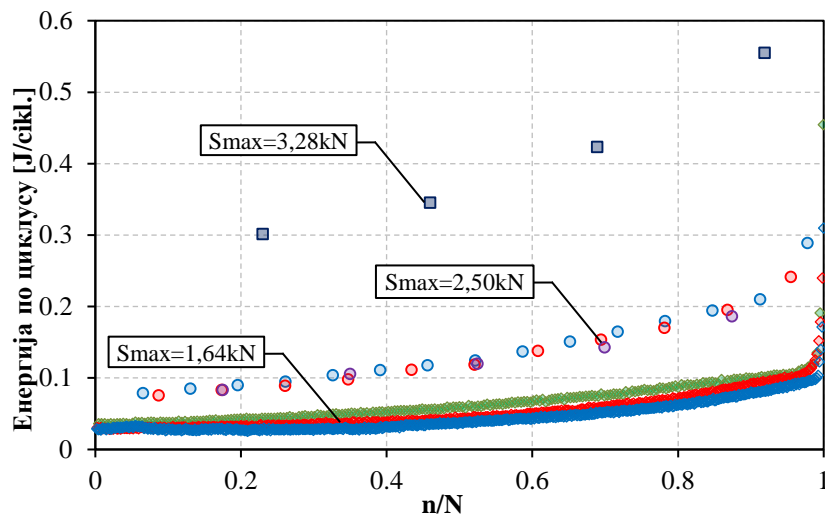


Слика 6.15 Дијаграм промене расипане енергије по циклусу са порастом броја циклуса - Lord 410GB

Код узорака спојених адхезивом Lord 410GB промена крутости је у највећем делу века трајања готово линеарна, при чему у последњих 10-20% века трајања долази до њене нагле деградације, праћене ломом узорка. Дијаграми крутости непосредно пре лома конвергирају ка вредности $\approx 1,6\text{kN/mm}$. Дијаграми промене енергије расипања по једном циклусу показују да са повећањем броја циклуса долази до све већег расипања енергије. Облик дијаграма је сличан као и у случају промене крутости. Линеарна промена у току највећег дела века трајања праћена је наглим порастом пред сам лом узорка.



Слика 6.16 Дијаграм промене крутости порастом броја циклуса - Kogapur 842



Слика 6.17 Дијаграм промене расипане енергије по циклусу са порастом броја циклуса - K6garur 842

За разлику од претходног случаја, промена крутости узорака спојених адхезивом K6garur 842 има нелинеаран карактер. Дијаграм карактерише константна закривљеност до непосредно пред лом узорака. Нагли пад крутости се дешава у веома кратком временском периоду (3-5% века трајања), што указује на чињеницу да у веку трајања узорака доминира период иницијације макро-оштећења (макро-прслине), чија је пропација веома брзо доводи до лома.

Важно је напоменути да се деформацијски одговор испитаних узорака не односи искључиво на понашање адхезива у споју, већ фасадног лима чији напони, како је показано анализом у поглављу 4.9 достижу границу течења.

6.1.2 Преостала чврстоћа

За одређивање преостале чврстоће фасадних спојева након излагања одређеном броју циклуса оптерећења, мањем од века трајања, најпре је било неопходно предвидети век трајања за сваки ниво оптерећења при коме су вршена испитивања. С обзиром да предвиђа најконзервативније вредности века трајања, у ту сврху је коришћена S-N крива одређена применом методе максималне веродостојности.

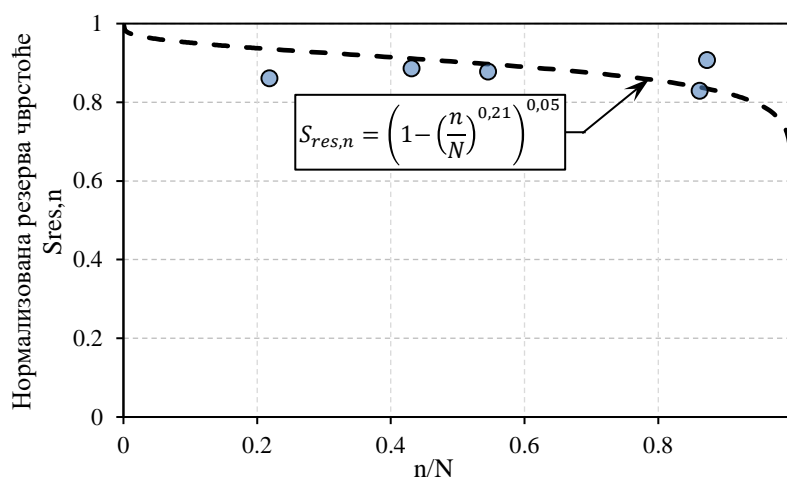
Испитивање преостале чврстоће је спроведено на фасадним спојевима израђеним помоћу адхезива Lord 410GB. Геометрија узорка и начин nanoшења оптерећења су исти као у случају испитивања века трајања, приказаном у претходном поглављу (6.1.1). Узорци су најпре излагани унапред дефинисаном броју циклуса оптерећења, након чега је уследила пауза од 5 секунди и настављено статичко испитивање узорка

до лома. Циклично оптерећење је наносено у режиму контролисане силе, са фреквенцијом $f=5\text{Hz}$ и степеном асиметрије циклуса $R=0,1$. Статичко испитивање је спроведено доношењем константне деформације померањем чељусту кидалице брзином од 10mm/min , као и у случају статичког испитивања приказаног у поглављу 4.5.2. Поставке и резултати испитивања приказани су у табели 6.4.

Табела 6.4 Преостала чврстоћа узорака фасадног споја – Lord 410GB

Бр.	S_{\max} [kN]	n	N	$\frac{n}{N}$	$\frac{S_{\max}}{S_u}$	S_R [kN]	$\frac{S_R}{S_u}$	$\frac{S_R - S_{\max}}{S_u - S_{\max}}$
1.	3,28	1000	4583	0,22	0,58	5.33	0.942	0,861
2.	3,28	2500	4583	0,55	0,58	5.37	0.949	0,808
3.	3,28	4000	4583	0,87	0,58	5.44	0.961	0,908
4.	2,50	30000	69619	0,43	0,44	5,30	0.936	0,886
5.	2,50	60000	69619	0,86	0,44	5,12	0.905	0,829

На основу резултата испитивања одређен је дијаграм нормализоване резерве чврстоће према моделу развијеном у поглављу 5.2.9, и приказани су на Слика 6.18. Деградација преостале чврстоће испитаних узорака веома мала у току већег дела века трајања. Након тога, пред сам лом, долази до наглог смањења чврстоће, у литератури познатог као „sudden death“ тип деградације чврстоће.



Слика 6.18 Нормализована резерва чврстоће - фасадни спој - Lord 410GB

6.2 Испитивање двоструких преклопних спојева

Испитивање понашања двоструких преклопних спојева под дејством цикличног оптерећења је, као и у случају фасадних спојева подељено у два сегмента. Најпре је

испитан век трајања и деформацијски одговор узорака излагањем цикличном оптерећењу до лома. Након тога је испитана преостала чврстоћа узорака претходно изложених унапред одређеном броју циклуса, који представља сегмент века трајања предвиђеног S-N кривом.

6.2.1 Испитивање излагањем цикличном оптерећењу до лома

Век трајања

Испитивање преклопних спојева цикличним оптерећењем до лома је извршено на узорцима чија су геометрија и начин израде приказани у поглављу 4.6. За спајање је коришћен адхезив Lord 410GB. Узорци су испитани на серво-хидрауличној универзалној кидалици MTS 810 (слика 6.1), максималног опсега силе 100kN. За мерење релативног померања унутрашњег у односу на спољашње адхеренте коришћен је контактни екстензометар типа HBM DD1 (слика 6.19), са распоном контактних тачака од 50mm и максималним померањем $\pm 2,5\text{mm}$. Снимање сигнала је вршено помоћу вишеканалног мерно-аквизиционог система Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) MGCplus (слика 6.3), са уграђеним модулима ML01B и ML55B.

Узорци су оптерећени наношењем силе променљивог интензитета у облику синусне функције константне амплитуде, са фреквенцијом $f=5\text{Hz}$ и степеном асиметрије циклуса $R=0,1$. У тренутку лома узорка бележен је број нанетих циклуса оптерећења. Испитано је 9 узорака у 3 нивоа оптерећења, при чему су сви испитани узорци доживели лом. Основни подаци о параметрима испитивања појединачних узорака, као и број нанетих циклуса оптерећења сумирани су у табели 6.5.



Слика 6.19 Диспозиција при испитивању двоструког преклопног споја под дејством цикличног оптерећења

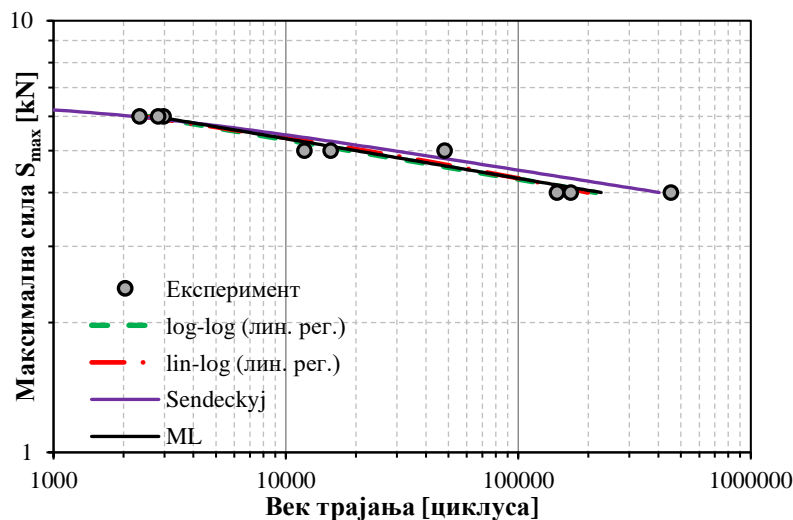
Табела 6.5 Испитивање века трајања узорка преклопног споја – Lord 410GB

Бр.	S_{max} [kN]	S_{min} [kN]	S_a [kN]	S_m [kN]	лом узорка	f [Hz]	R	N
1.	6,00	0,60	2,70	3,30	да	5	0,1	2341
2.	6,00	0,60	2,70	3,30				2816
3.	6,00	0,60	2,70	3,30				2973
4.	5,00	0,50	2,25	2,75				12007
5.	5,00	0,50	2,25	2,75				15564
6.	5,00	0,50	2,25	2,75				48163
7.	4,00	0,40	1,80	2,20				146362
8.	4,00	0,40	1,80	2,20				168185
9.	4,00	0,40	1,80	2,20				452722

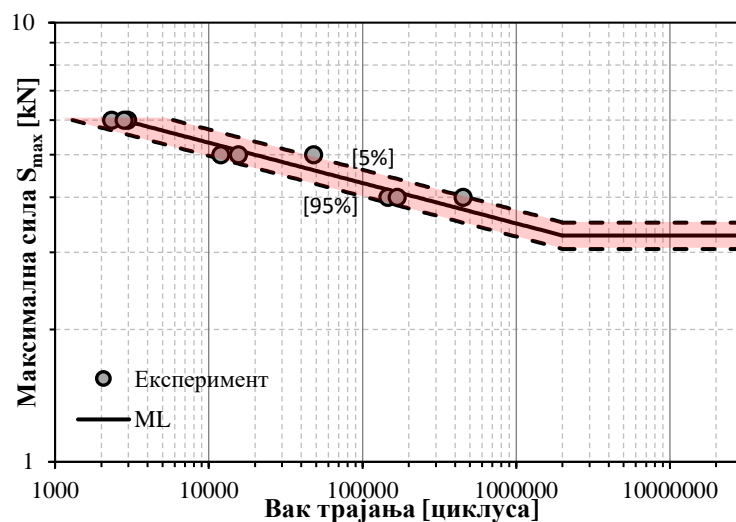
Табела 6.6 Параметри S-N кривих – двоструки преклопни спојеви

Модел	Једначина	Параметар 1	Параметар 2	S_a [kN]
лин. – лог.	(5.2)	$a = 9.13574$	$b = -0.95914$	2,955
лог. – лог.	(5.3)	$a = 11.90393$	$b = -10.91373$	3,261
Сендецкиј	(5.8)	$C = 0.00069$	$S = 0.08622$	3,492
макс. вер.	(5.17)	-	$k = -10.88230$	3.275

На основу регистрованих векова трајања, истим поступцима као у случају фасадних спојева одређене су S-N криве. Срачунати параметри математичких модела S-N кривих и њима предвиђене динамичке чврстоће приказани су у табели 6.6. Поређење различитих S-N кривих је приказано на слици 6.20. Степен расипања резултата испитивања је илустрован на слици 6.21, на којој је приказана S-N крива одређена методом максималне веродостојности са интервалом поверења од 90%.



Слика 6.20 Поређење S-N кривих двоструких преклопних спојева – Lord 410GB



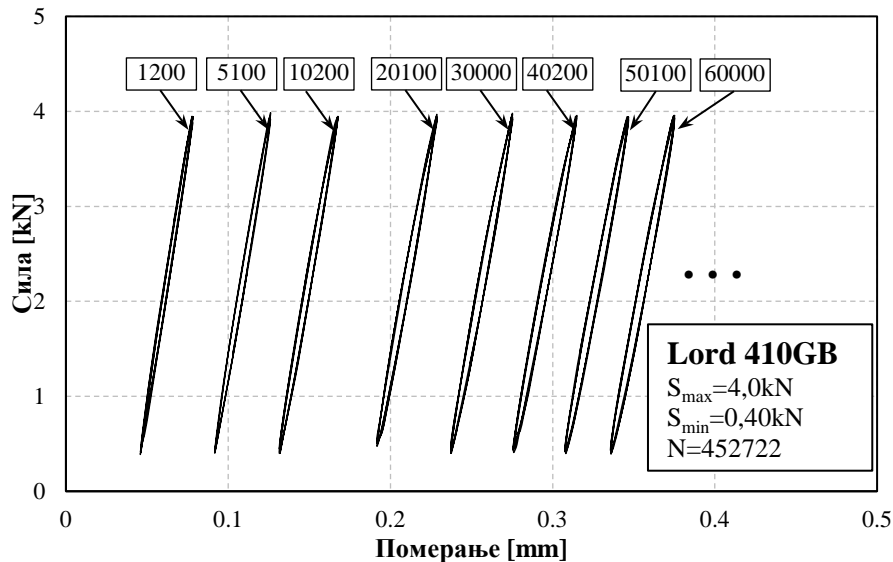
Слика 6.21 Предвиђање века трајања двоструких преклопних спојева са интервалом поверења од 90% - Lord 410GB

За разлику од фасадних спојева, у случају двоструких преклопних спојева све анализе, осим случаја примене Сендецкијевог модела, су дале скоро идентична предвиђања у области између 10^3 и 10^5 циклуса. Сендецкијевим моделом је одређен

најблажи нагиб линеарног дела S-N криве, односно најнеконзервативније вредности века трајања. Степен расипања резултата је нешто нижи у односу на фасадне спојеве израђене применом истог адхезива.

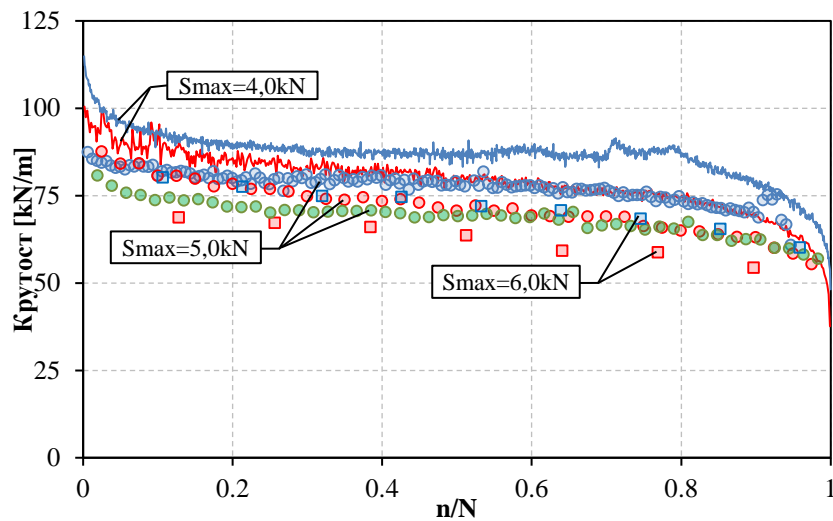
Деформацијски одговор узорака

Деформацијски одговор двоструких преклопних спојева анализиран је помоћу резултата добијених мерењем релативног померања унутрашњег у односу на спољашње адхеренте. Ради поједностављења прорачуна, целокупно мерено померање је приписано деформацији адхезива. Ово се може сматрати оправданим, имајући у виду велику разлику у вредностима модула еластичности адхезива и адхерената, као и резултате нумеричког прорачуна приказане у поглављу 4.9. Снимање сигнала је вршено на исти начин као у случају фасадних спојева. Излазне датотеке су садржале податке о 5 од сваких 300 циклуса оптерећења, са 16 измерених вредности по циклусу. При дејству константног цикличног оптерећења уочено је формирање еластичних хистерезиса, чији се нагиб (крутост) и површина (расипана енергија у оквиру једног циклуса) мењају у току времена (слика 6.22).



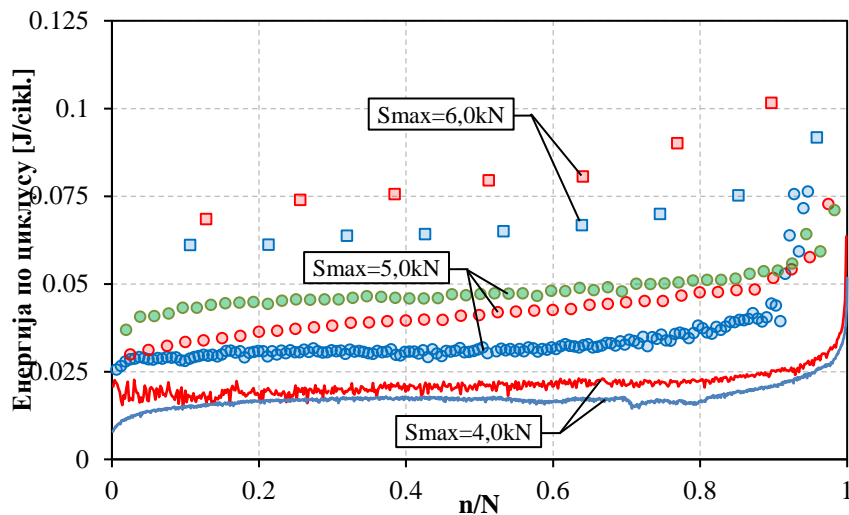
Слика 6.22 Пример деформацијског одговора двоструког преклопног споја под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде

Применом поступка описаног у поглављу 6.1.1, помоћу развијеног MATLAB програма срачунате су вредности крутости и расипане енергије у току једног циклуса оптерећења, током целог века трајања узорака. Дијаграми промене крутости и расипане енергије по циклусу оптерећења су приказани на сликама 6.23 и 6.24, респективно.



Слика 6.23 Дијаграм промене круто́сти порастом броја циклуса – Lord 410GB

На дијаграмима промене круто́сти се могу уочити три зоне. На самом почетку века трајања уочљив је значајан пад круто́сти узорака. Након тога долази до стабилизације узорака и линеарне деградације круто́сти у току већег дела века трајања. У последњих 10-20% века трајања брзина промене круто́сти се нагло повећава до тренутка лома. Сви узорци су показали сличан ток промене круто́сти, који се може описати сигмоидном функцијом, каква је предложена у поглављу 5.2.10.



Слика 6.24 Дијаграм промене расипане енергије по циклусу са порастом броја циклуса – Lord 410GB

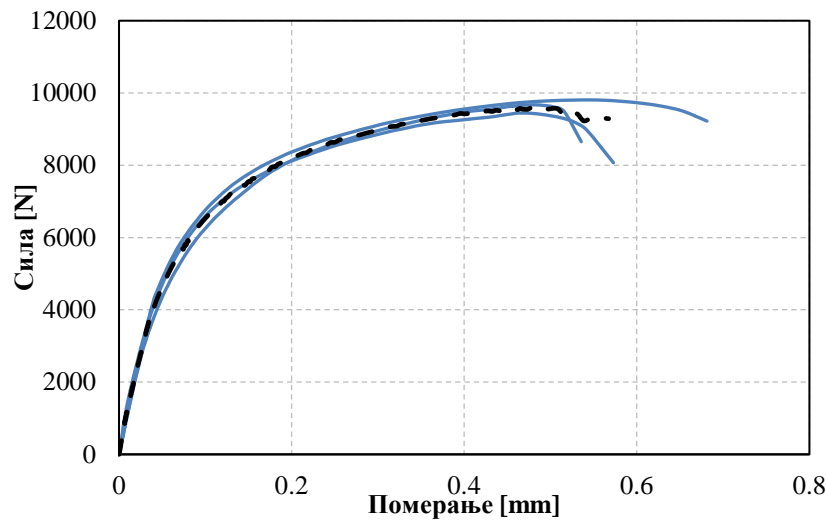
На дијаграмима расипане енергије по циклусу се такође могу уочити три зоне: зона иницијалног раста расипане енергије, зона линеарне промене и зона наглог раста пред сам крај века трајања. У односу на фасадне спојеве, груписање дијаграма при



истом нивоу оптерећења је нешто мање изражено. То се може приписати чињеници да, у случају двоструких преклопних спојева већи утицај на површину хистерезисне петље има сам адхезив, који у себи може садржати различити ниво иницијалних микрооштећења.

6.2.2 Преостала чврстоћа

Испитивање преостале чврстоће двоструких преклопних спојева је спроведено на узорцима описаним у поглављу 4.6. Међутим, како је приликом испитивања века трајања уочено је да су при нивоима оптерећења незнатно нижим од вредности статичке чврстоће (поглавље 4.6) узорци издржавали по више хиљада циклуса оптерећења, дошло се до претпоставке да се статичка чврстоћа двоструких преклопних спојева битно мења са променом брзине наношења оптерећења (деформације). Из тог разлога је извршено и додатно испитивање квази-статичке чврстоће узорака брзинама наношења деформације какве се јављају при дејству цикличног оптерећења. Проблем у тачном одређивању брзине деформације је у томе што је у случају испитивања века трајања оптерећења наношено према синусној функцији, па је прираштај силе, односно деформације, променљив у току времена. На основу анализе излазних сигнала испитивања узорака цикличним оптерећењем закључено је да је у средишњој зони растућег или опадајућег дела дијаграма померања у току времена прираштај деформације био релативно константан, и има просечну вредност приближно једнаку 70mm/min , за испитане нивое оптерећења. Стога је ова брзина деформације коришћења за квази-статичко испитивање узорака, као и за испитивање преостале чврстоће. Резултати квази-статичког испитивања су приказани на слици 6.25. На основу њих се може закључити да је чврстоћа узорака битно повећана у односу на узорке испитане брзином деформације од $1,25\text{mm/min}$, и износи $9,64\text{kN}$.



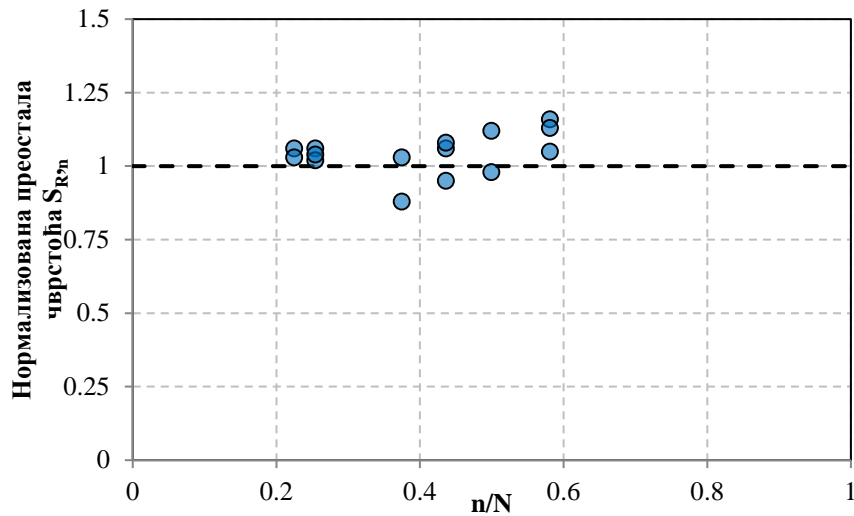
Слика 6.25 Дијаграм сила-померање узорака испитаних са брзином деформације од 70mm/min

Табела 6.7 Резултати испитивања преостале чврстоће двоструких преклопних спојева

Бр.	S_{max} [kN]	n	N	$\frac{n}{N}$	$\frac{S_{max}}{S_u}$	S_R [kN]	$\frac{S_R}{S_u}$	$\frac{S_R - S_{max}}{S_u - S_{max}}$
1.	6,0	700	2754	0,25	0,62	10.26	1.06	1.17
2.	6,0	700	2754	0,25	0,62	9.82	1.02	1.05
3.	6,0	700	2754	0,25	0,62	10.07	1.04	1.12
4.	6,0	1200	2754	0,43	0,62	10.26	1.06	1.17
5.	6,0	1200	2754	0,43	0,62	9.13	0.95	0.86
6.	6,0	1200	2754	0,43	0,62	10.42	1.08	1.21
7.	6,0	1600	2754	0,58	0,62	11.23	1.16	1.44
8.	6,0	1600	2754	0,58	0,62	10.17	1.05	1.15
9.	6,0	1600	2754	0,58	0,62	10.92	1.13	1.35
10.	5,0	4500	20026	0,22	0,52	10.26	1.06	1.13
11.	5,0	4500	20026	0,22	0,52	9.93	1.03	1.06
12.	5,0	7500	20026	0,37	0,52	9.96	1.03	1.07
13.	5,0	7500	20026	0,37	0,52	8.45	1.12	1.25
14.	5,0	10000	20026	0,50	0,52	10.82	0.88	0.74
15.	5,0	10000	20026	0,50	0,52	9.48	0.98	0.97

Преостала чврстоћа је одређена за сегменте века трајања предвиђене S-N кривом чији су параметри одређени применом методе максималне веродостојности (слика 6.21). Резултати испитивања су приказани у табели 6.7. На основу вредности

преосталих чврстоћа срачунате су вредности нормализоване резерве чврстоће и приказане на слици 6.26.



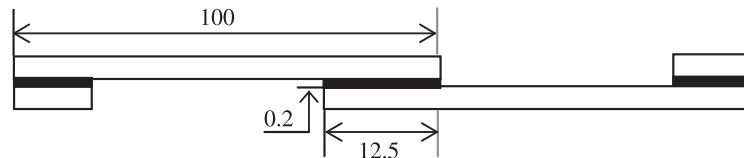
Слика 6.26 Нормализована преостала чврстоћа двоструких преклопних спојева

На основу експерименталних података регистрован је пораст преостале чврстоће на сегменту између 20% и 60% века трајања. Овај феномен је веома често регистрован код композитних ламината са матрицом од епоксидних адхезива [152–155]. У доступној литератури се он приписује тзв. „wear in“ ефекту који представља резултат релаксације и прерасподеле напона током дејства цикличног оптерећења у зонама њихове концентрације, што је одлика дуктилних адхезива [154]. Предложени модел НРЧ, као и модели преостале чврстоће, сумирани у поглављу 5.3.2, не могу описати растући део криве. У истраживањима у доступној литератури њихови параметри су одређивани занемарујући резултате на делу криве на коме је преостала чврстоћа већа од вредности статичке чврстоће. Међутим, с обзиром да на сегменту века трајања, на коме су вршена испитивања у овом истраживању, није регистрован пад преостале чврстоће, параметре предложеног модела није могуће одредити.

6.3 Валидација модела НРЧ и предложене методе предвиђања века трајања

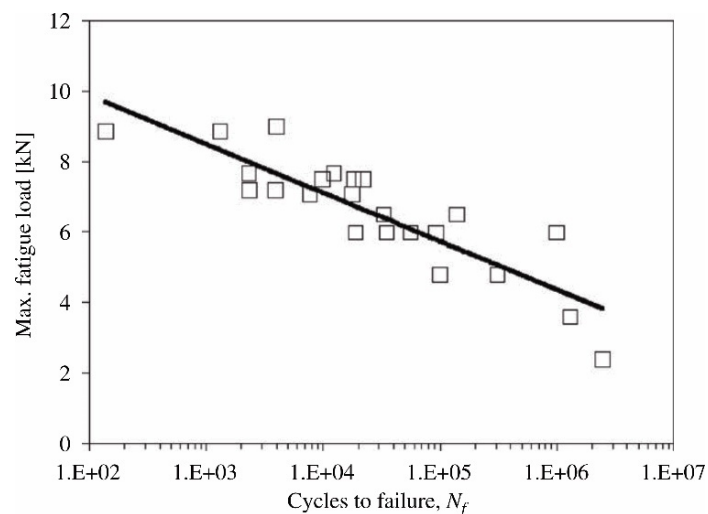
С обзиром да за резултате приказане у претходном поглављу није било могуће одредити параметре предложеног модела НРЧ, његова валидација, као и валидација поступка предвиђања века трајања при дејству променљивог цикличног оптерећења је спроведена помоћу експерименталних резултата испитивања једноструких преклопних спојева, објављених у [91]. Испитивања су спроведена на адхезионим спојевима

адхерената од легуре алуминијума 7075-T6, спојеног епоксидним адхезивом FM 73M, компаније Cytec Engineered Materials. Површине адхерената су претходно припремљене посебним ACDC анодизационим поступком [156]. Геометрија узорака је приказана на слици 6.27.



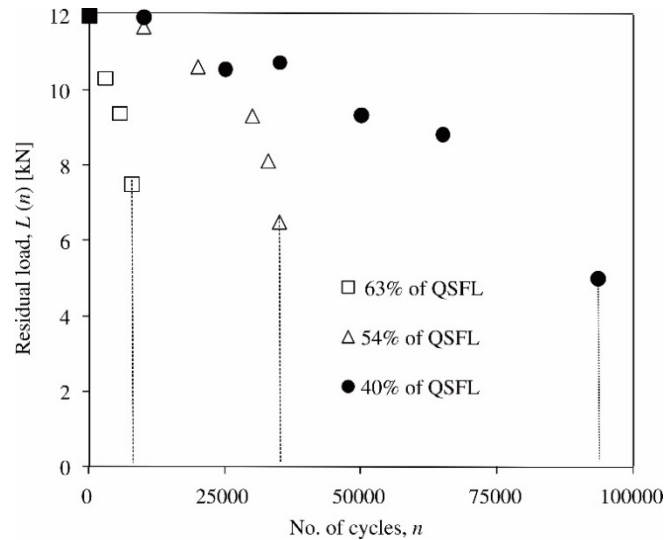
Слика 6.27 Геометрија споја [91]

У оквиру поменутог истраживања узорци су испитани при дејству статичког, константног цикличног и променљивог цикличног оптерећења. Чврстоћа узорака при статичком испитивању константном деформацијом од 0,1mm/min је била 11,95kN. Испитивање века трајања је спроведено при различитим нивоима оптерећења истог степена асиметрије циклуса $R=0,1$, са фреквенцијом од $f=5\text{Hz}$. Резултати испитивања и S-N крива су приказани на слици 6.28.



Слика 6.28 S-N крива једноструких преклопних спојева, према [91]

Испитивање преостале чврстоће након парцијалног замора је спроведено при нивоима оптерећења од 7,5kN, 6,5kN и 4,8kN, који одговарају 63%, 54% и 40% статичке чврстоће, респективно. Узорци су излагани унапред дефинисаном броју циклуса оптерећења, након чега су вршена статичка испитивања ради одређивања преостале чврстоће. Резултати су приказани на слици 6.29, где испрекидане вертикалне линије означавају тренутак лома, односно век трајања при посматраном нивоу оптерећења.

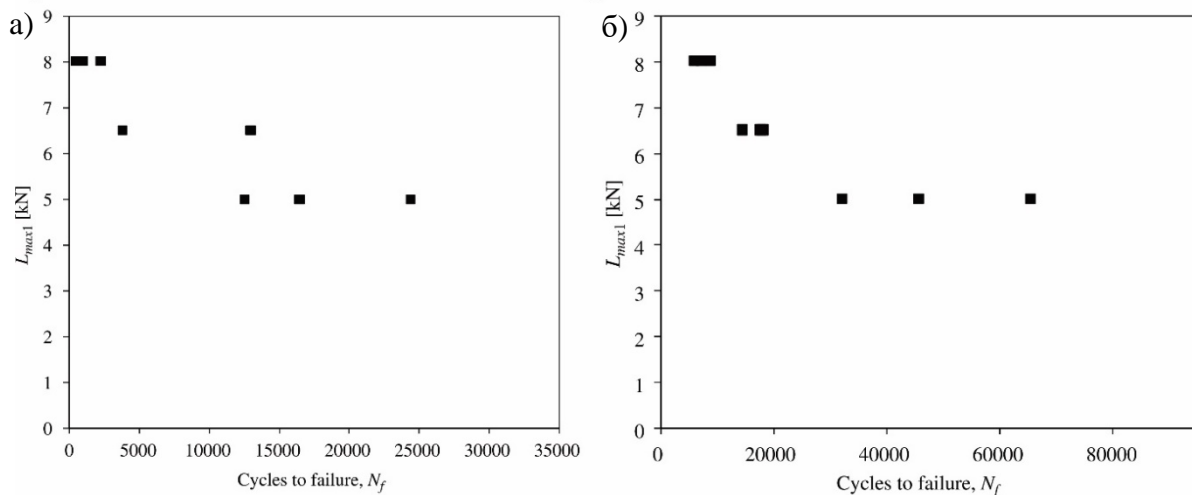


Слика 6.29 Преостала чврстоћа једноструких преклопних спојева, према [91]

Последњи корак у испитивању је представљао одређивање века трајања спојева при променљивом цикличном оптерећењу. Примењена су два различита спектра оптерећења. Први спектар, означен као тип А, се састојао од 10 циклуса првог и 5 циклуса другог нивоа оптерећења. Други спектар, тип В, се састојао од 1000 циклуса првог и 5 циклуса другог нивоа оптерећења. При томе су за сваки спектар испитане по три различите комбинације нивоа оптерећења, приказане у табели 6.8. Резултати испитивања су приказани на слици 6.30. На апсциси је приказан укупан број циклуса до настанка лома који је једнак збиру укупног броја циклуса првог и другог нивоа оптерећења, док ордината означава интензитет максималне силе првог нивоа оптерећења.

Табела 6.8 Комбинације нивоа оптерећења различитих спектра

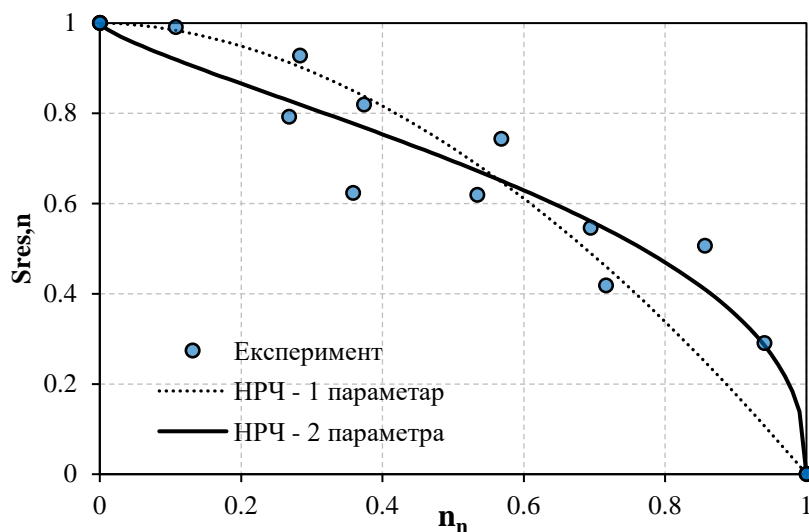
Спектар	S_{max1} [kN]	S_{max2} [kN]	n_1	n_2
Тип А	5	7	10	5
	6,5	8	10	5
	8	9,5	10	5
Тип В	5	7	1000	5
	6,5	8	1000	5
	8	9,5	1000	5



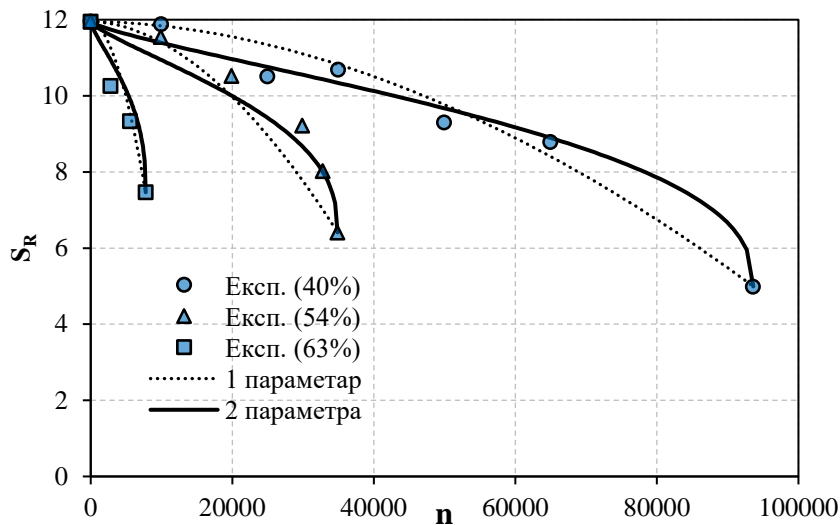
Слика 6.30 Век трајања спојева при променљивом цикличном оптерећењу, према [91]:
а) спектар А; б) спектар В

6.3.1 Модел нормализоване резерве чврстоће

Применом приказаних експерименталних резултата, најпре је спроведена валидација модела НРЧ при дејству константног цикличног оптерећења, развијеног у поглављу 5.2.9. За податке приказане на слици 6.29 срачунате су вредности НРЧ, на основу којих су одређене криве, представљене једначинама (5.64) и (5.65). Параметри једначина су добијени фитовањем према експерименталним подацима, применом методе најмањих квадрата [157]. Срачунате вредности параметара су $\alpha=1,85$ за једно-параметарски, односно $\alpha=0,747$ и $\beta=0,403$ за дво-параметарски модел. Поређење кривих са експерименталним подацима је приказано на слици 6.31. Помоћу срачунатих параметара модела, применом једначине (5.66), одређене су криве преостале чврстоће (слика 6.32).



Слика 6.31 Поређење кривих НРЧ са експерименталним подацима



Слика 6.32 Криве преостале чврстоће

Табела 6.9 R^2 вредности кривих НРЧ

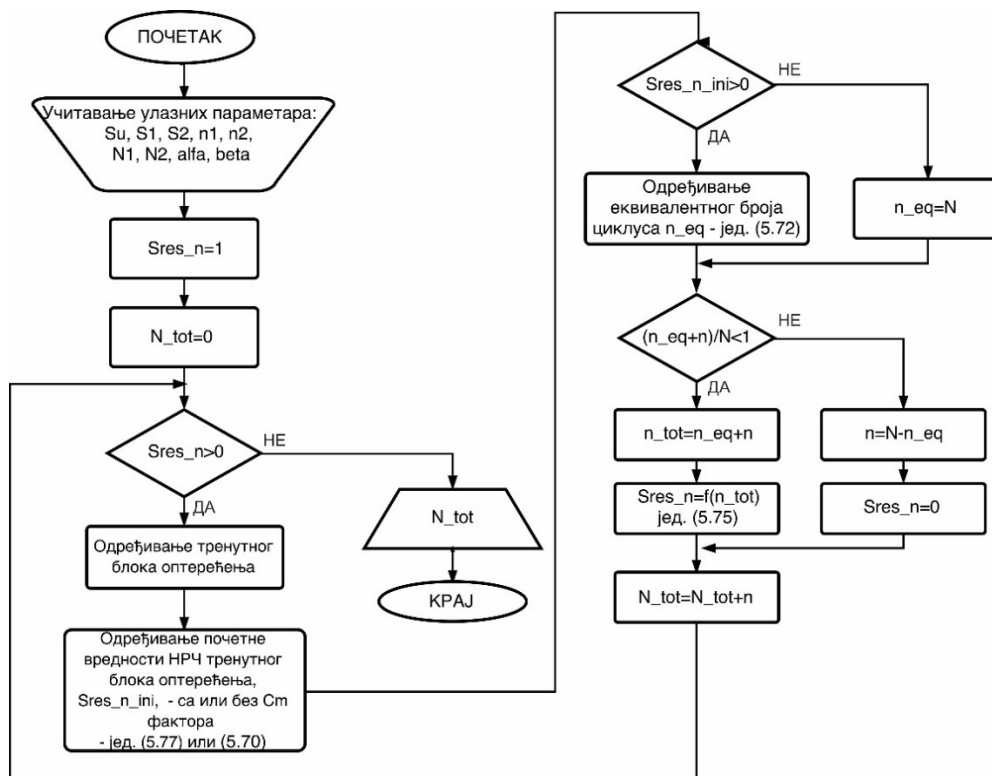
Случај	1-параметарски модел	2-параметарски модел
Сви нивои оптерећења	0.8171	0.9197
40%	0.9686	0.9831
54%	0.8546	0.9605
63%	0.898	0.9245

Анализом кривих приказаних на сликама 6.31 и 6.32 може се регистровати да је тренд промене НРЧ, као и преостале чврстоће, боље представљен применом дво-параметарског модела. Степен подударања кривих са експерименталним подацима је додатно оцењен применом регресионе анализе. Одређене су вредности R^2 за сваки ниво оптерећења посебно, као и за цео скуп експерименталних података (табела 6.9). Високе вредности R^2 указују на веома добро подударање кривих са експерименталним подацима. Очигледно је да је дво-параметарски модел у свим случајевима дао боље резултате, чиме је, како је и очекивано, оправдано увођење додатног параметра β . При томе, његов додатни квалитет представља уједначен степен подударања са експерименталним подацима за сва три нивоа оптерећења. Тиме је показано да се исте вредности параметара могу користити за предвиђање деградације чврстоће под дејством константног цикличног оптерећења, независно од нивоа оптерећења, што је била и полазна претпоставка при извођењу модела.

6.3.2 Одређивање века трајања при дејству променљивог цикличног оптерећења применом модела НРЧ

У овом поглављу је приказана валидација методе за предвиђање века трајања при дејству променљивог цикличног оптерећења, применом модела НРЧ. Поступак одређивања века трајања се састоји из две фазе. Прву фазу представља одређивање параметара модела НРЧ при дејству константног цикличног оптерећења. У другој фази се помоћу срачунатих параметара, применом методе приказане у поглављу 5.3.4, одређује век трајања за произвољни спектар оптерећења. За одређивање века трајања развијен је алгоритам, приказан на слика 6.33, према коме је написан посебан MATLAB програм.

Одређивање века трајања при дејству спектра оптерећења приказаних у Табела 6.8 спроведено је помоћу параметара модела НРЧ, срачунатих у претходном поглављу. Важно је напоменути да приказани спектри садрже нивое оптерећења који нису коришћени за одређивање вредности параметара. Међутим, како је полазна претпоставка модела НРЧ да се истим параметрима може представити деградација чврстоће независно од нивоа оптерећења, укључивање додатних нивоа оптерећења при одређивању вредности параметара није неопходно.

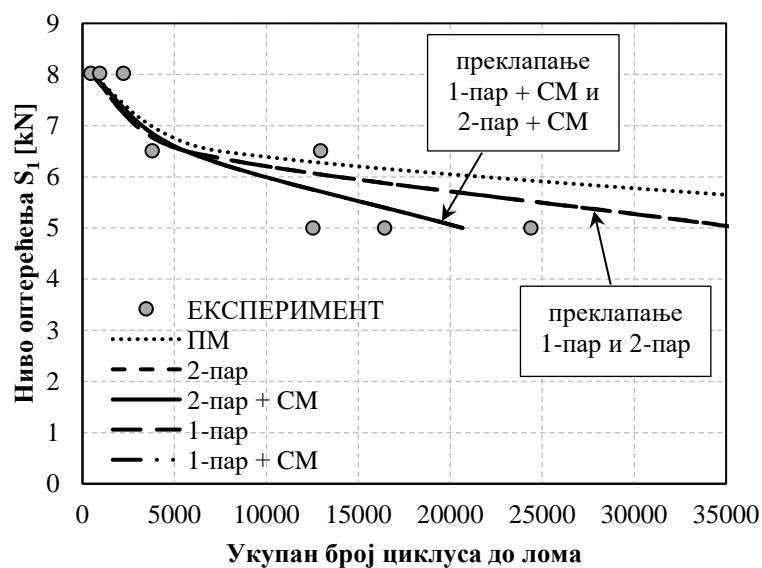


Слика 6.33 Псеудо-алгоритам програма за одређивање века трајања при дејству променљивог цикличног оптерећења

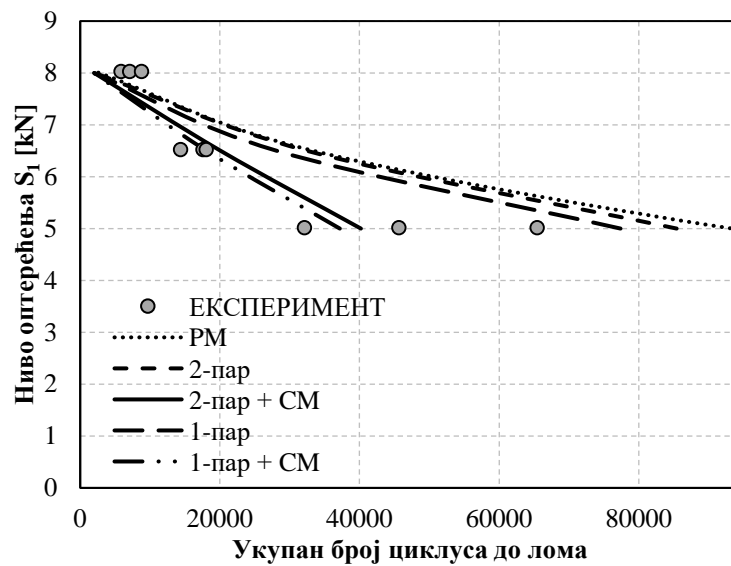
Валидација добијених вредности века трајања је извршена поређењем са експерименталним подацима приказаним на слици 6.30, као и са предвиђањима добијеним применом Палмгрен-Минеровог модела кумулативног оштећења (јед. (5.53)), који представља најстандардније средство за оцену века трајања при дејству променљивог цикличног оптерећења. Предвиђање века трајања је извршено применом 5 различитих анализа:

- 1) Применом Палмгрен-Минеровог модела кумулативног оштећења.
- 2) Применом једно-параметарског модела НРЧ без узимања у обзир утицаја „сycle mix“ ефекта на век трајања узорака.
- 3) Применом једно-параметарског модела НРЧ са увођењем „сycle mix“ фактора.
- 4) Применом дво-параметарског модела НРЧ без узимања у обзир утицаја „сycle mix“ ефекта на век трајања узорака.
- 5) Применом дво-параметарског модела НРЧ са увођењем „сycle mix“ фактора.

Вредности „сycle mix“ фактора у случајевима 3 и 5 су рачунате према моделу који су предложили Ерполат и остали [133], јед. (5.63). Параметри једначине који су коришћени за одређивање „сycle mix“ фактора су $\alpha = 2,41 \times 10^{-4}$ и $\beta = 0,88$ за спектар типа А, односно $\alpha = 30,12 \times 10^{-3}$ и $\beta = 4,0 \times 10^{-3}$ за спектар типа В. Упоређења предвиђања века трајања и експерименталних података су приказана на сликама 6.34 и 6.35.

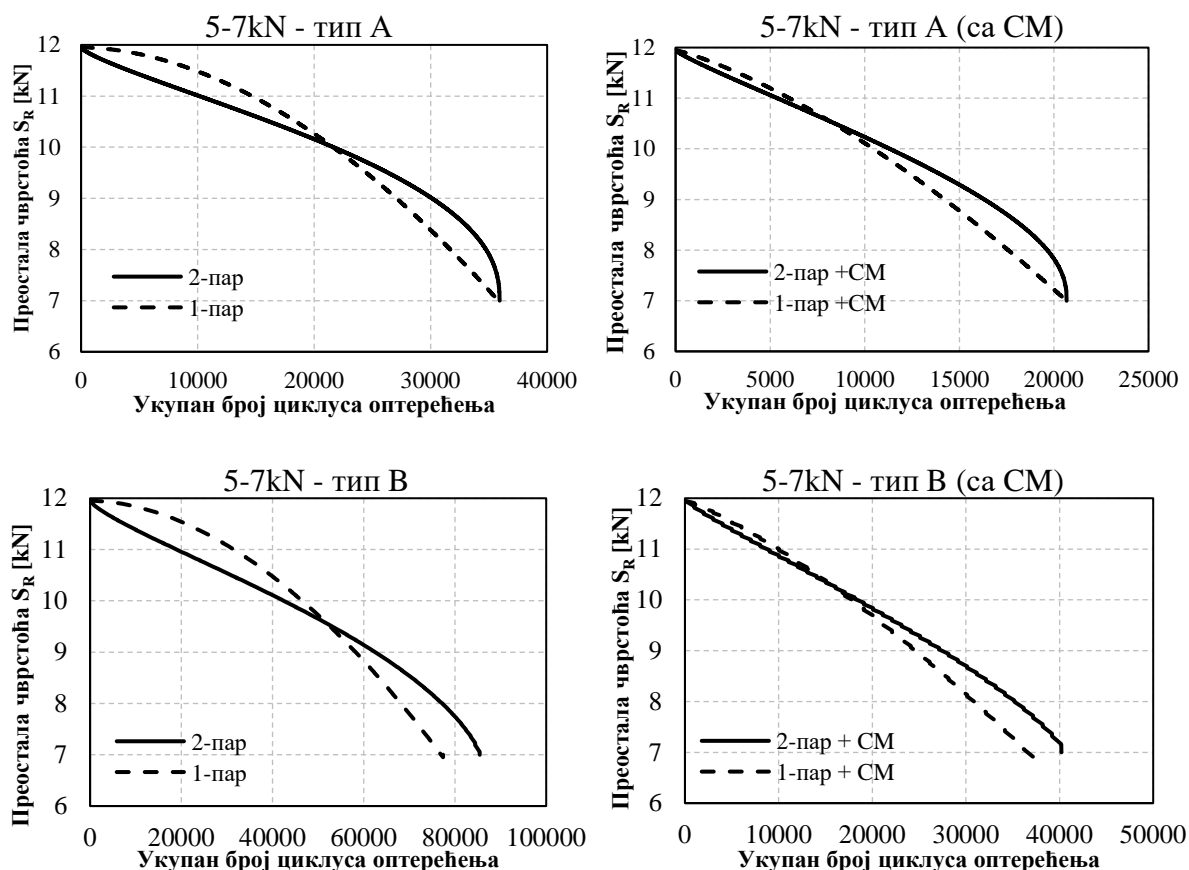


Слика 6.34 Поређење предвиђања века трајања и експ. података – спектар А



Слика 6.35 Поређење предвиђања века трајања и експ. података – спектар В

Може се приметити да је примена модела НРЧ у свим случајевима дала боља предвиђања у односу на Палмгрен-Минеровог модел. Међутим, предвиђања века трајања у случајевима у којима није узет у обзир „cycle mix“ ефекат су неконзервативна, поготово при нижим нивоима оптерећења. Ово указује на чињеницу да учесталост промене нивоа оптерећења у великој мери утиче на век трајања испитаних узорка, што је у [91] такође констатовано. Укључивањем „cycle mix“ фактора при одређивању века трајања значајно су побољшана предвиђања за оба типа спектра оптерећења. Са друге стране, за разлику од случаја представљања деградације чврстоће при константном цикличном оптерећењу, разлика у предвиђању века трајања применом једно-параметарског и дво-параметарског модела је незнатна. У случају спектра типа А ова два модела дају иста предвиђања, односно криве се поклапају. Међутим, разлика између ова два модела се ипак може констатовати на дијаграму преостале чврстоће током деловања променљивог цикличног оптерећења, што на примеру спектра 5-7kN илустровано на слици 6.36.



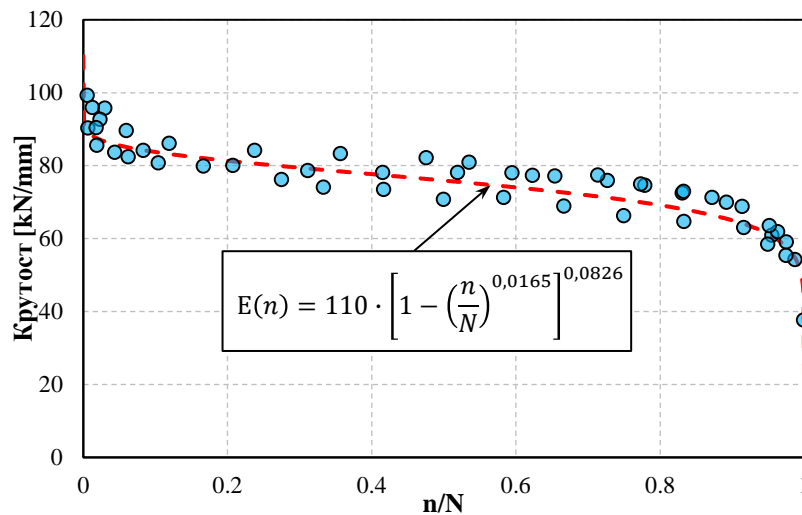
Слика 6.36 Пример тока преостале чврстоће при дејству променљивог цикличног оптерећења

6.3 Валидација методе предвиђања века трајања неразарајућим поступком испитивања

Основни циљ методе предложене у поглављу 5.2.10 је предвиђање века трајања појединачног узорка, на основу претходно одређених параметара помоћу резултата испитивања истоветних узорака. Она се заснива на праћењу промене крутости споја са порастом броја циклуса оптерећења, која представља резултат акумулације оштећења. За валидацију модела су коришћени резултати испитивања двоструких преклопних спојева, приказани у поглављу 6.2. При томе, сви узорци су испитани излагањем константном цикличном оптерећењу до тренутка лома. То је омогућило да се одређени број узорака искористи за одређивање параметара, док је други део узорака искоришћен за валидацију модела анализом података на одређеном сегменту века трајања.

Ток промене крутости је описан једначином (5.51), чији су параметри одређени фитовањем према експерименталним подацима, методом најмањих квадрата. За

одређивање параметара су коришћени подаци испитивања прва 3 узорка ($S_{\max}=5\text{kN}$, $N=48163$; $S_{\max}=4\text{kN}$, $N=168185$; $S_{\max}=5\text{kN}$, $N=12007$). За фитовање је коришћена средња вредност почетне крутости $E_0=110\text{kN/m}$, одређена из резултата статичког испитивања. Параметри модела, који су дали најбоље поклапање криве са експерименталним подацима (слика 6.37), су $\alpha=0,0162$ и $\beta=0,0826$.

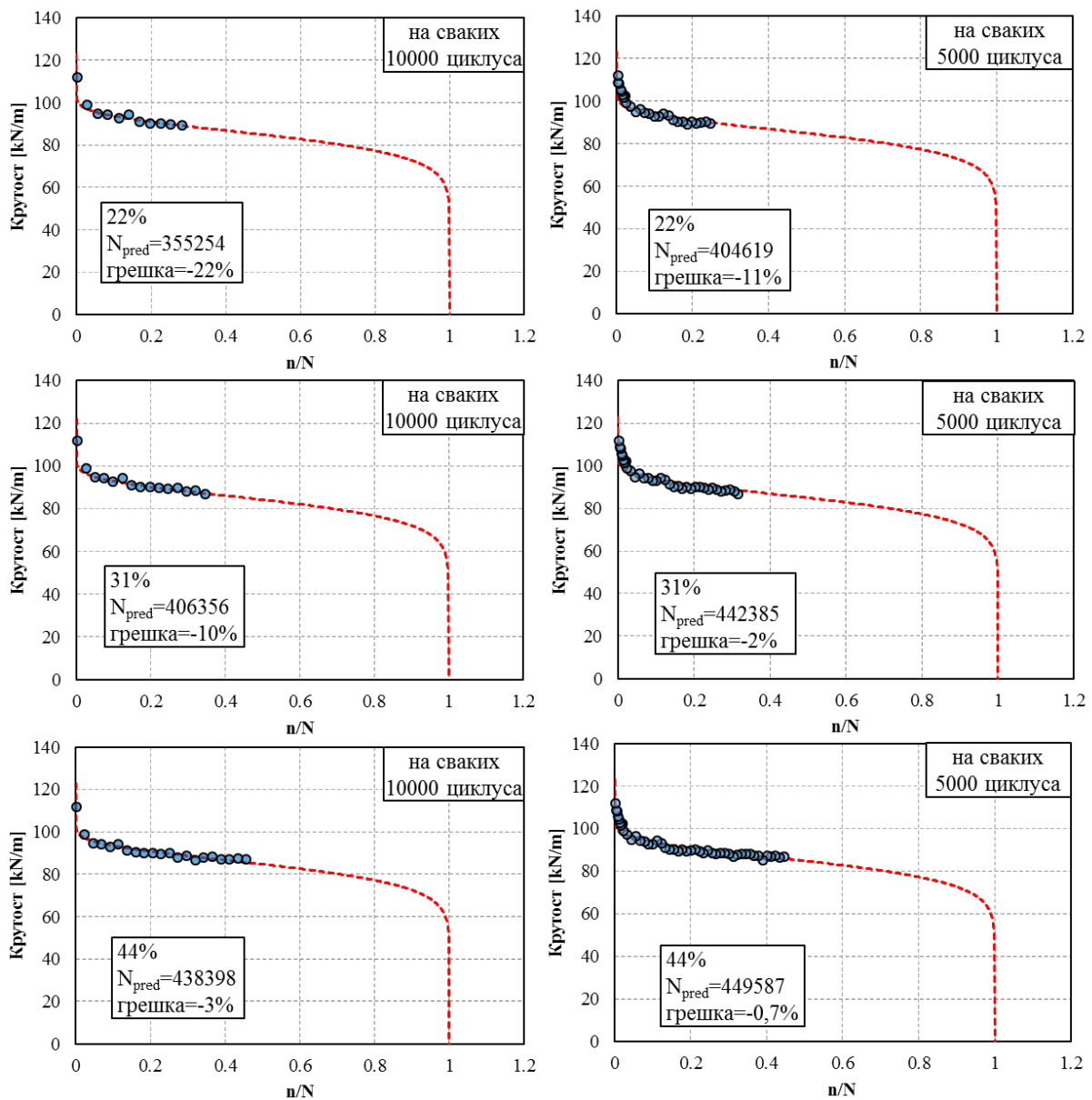


Слика 6.37 Одређивање параметара модела промене крутости

На основу параметара одређених у претходном кораку, предвиђен је век трајања за узорке који нису коришћени за њихово одређивање. За анализу су коришћени подаци на сегменту од 20-50% века трајања посматраних узорака. При томе, већи сегмент века трајања је коришћен код узорака чији је век трајања био најкраћи. Разлог за то је чињеница да подаци су о узорцима са веком трајања од 2341 и 2816 садржали свега 7, односно 9 вредности. Резултати предвиђања, заједно са експерименталним вредностима века трајања, су приказани у табели 6.10. У претпоследњој колони је приказан век трајања који се предвиђа S-N кривом за посматрани ниво оптерећења. На основу поређења одступања предвиђања од тачних вредности, може се закључити да се предложеном методом може знатно тачније одредити век трајања појединачног узорка.

Табела 6.10 Резултати предвиђања века трајања

$S_{\max 1}$ [kN]	E_0 [kN/mm]	N_{pred}	N_{real}	Одступање	S-N	Одст. (S-N)
6	106	2618	2816	-7%	2754	2%
6	93	2230	2341	-5%	2754	18%
5	98	16886	15564	8%	20056	29%
4	120	440665	452722	-3%	227094	50%



Слика 6.38 Предвиђање века трајања за различите сегменте века трајања

На примеру узорка који је при нивоу оптерећења од 4kN „преживео“ 452722 циклуса је извршена анализа утицаја промене густине експерименталних података и коришћеног сегмента века трајања на тачност предвиђања. У анализи су коришћени сегменти века трајања од 22%, 31% и 44%, као подаци о крутости на сваких 5000, односно сваких 10000 циклуса оптерећења. Фитоване криве и експериментални подаци су приказани на слици 6.38. На основу приказаних резултата се може закључити да се применом предложеног модела већ након 20% века трајања могао веома добро



предвидети број циклуса који испитивани узорак може да издржи. Са порастом сегмента века трајања, тачност предвиђања је расла. Са друге стране, може се закључити да је са повећањем густине података такође порасла поузданост предвиђања, премда су веома добри резултати добијени и коришћењем мање густине.

7 ЗАВРШНЕ НАПОМЕНЕ И ЗАКЉУЧЦИ

Адхезиони спојеви пружају бројне погодности које могу да надокнаде одређене недостатке традиционалних метода спајања у металним конструкцијама. Међутим, недостатак одговарајућих стандарда за испитивање и прорачун у овој области примене у великој мери ограничава њихову ширу употребу. Постоји велики број фактора који се морају узети у обзир приликом прорачуна и предвиђања понашања адхезионих спојева у експлоатационим условима. Штавише, ови фактори се разликују у зависности од гране индустрије у којој се примењују. Пут до стандардизације подразумева опсежна експериментална испитивања њиховог понашања у различитим експлоатационим условима. Поред избора геометрије и процеса израде споја, као и ефеката повишене температуре и влажности ваздуха, највећи утицај на понашање адхезионих спојева има врста оптерећења којој су изложени.

Основни циљ докторске дисертације је био да се применом савремених експерименталних и нумеричких метода:

- изврши одабир методе обраде површина адхерената пре спајања,
- истражи и опише понашање адхезионих спојева при дејству статичког и цикличног оптерећења, и
- формулишу модели и поступци за описивање и предвиђање њиховог понашања у условима карактеристичним за примену у грађевинским конструкцијама.

7.1 Закључци

У оквиру овог истраживања спроведено је експериментално испитивање утицаја статичког и цикличног оптерећења на два карактеристична типа адхезионих спојева лаких металних конструкција: фасадни спој трапезастог лима и прикључног Т-профила и двоструки преклопни спој. Адхеренти оба поменута споја су израђени од поцинкованих лимова. Коришћене су различите врсте адхезива у слојевима дебљине 1mm. На основу резултата спроведених испитивања, као и експерименталних резултата из доступне литературе, у овој дисертацији, формулисани су модели и методе којима је



могуће описати и предвидети њихово понашање под дејством статичког и цикличног оптерећења.

С циљем добијања адекватних резултата који се могу користити за формулисање модела који служе за описивање понашања адхезионих спојева, најпре је извршен одабир поступка обраде површине пре спајања, којим се обезбеђује кохезиони лом узорака. На основу испитивања утицаја различитих поступака обраде површина адхерената на механизам лома и носивост споја, како при собној тако и повишеној температури, закључено је да сачмарење адхерената челичном сачмом пружа задовољавајуће резултате и обезбеђује кохезиони лом спојева у експлоатационим условима.

Главни резултати истраживања и научни доприноси дисертације се могу поделити и по врсти оптерећења на коју се односе.

Понашање поменути два типа споја под дејством статичког оптерећења је експериментално истражено и нумерички моделирано применом методе коначних елемената у софтверском пакету ABAQUS. Основни проблем у одређивању параметара материјала експерименталним путем је чињеница да је већина поступака испитивања развијена за врсте спојева и геометрије који су карактеристични за ауто и авио индустрију. За одређивање параметара материјала адхезива у овом истраживању коришћен је поступак који до сада није примењен у истраживањима у доступној литератури, што представља посебан допринос ове докторске дисертације. Комбиновањем експерименталних резултата испитивања чеоних спојева крутих адхерената и двоструких преклопних спојева поцинкованих лимова одређена су механичка својства адхезива и параметри материјала неопходни за његово дефинисање у нумеричком моделу у ABAQUS-у, како у еластичној тако у пост-еластичној области. При томе, на основу прелиминарне анализе двоструких преклопних спојева у ABAQUS-у, најпре је извршена корекција прорачунских вредности параметара материјала. Коришћењем тако добијених вредности, спроведен је коначни прорачун напонско-деформацијског стања предметних спојева. Резултати нумеричког прорачуна су показали веома задовољавајуће поклапање са експерименталним резултатима.

Главни доприноси ове дисертације у области истраживања понашања адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења се могу поделити у два сегмента: теоријски и експериментални.

У теоријском делу је најпре извршена систематизација теоријских поставки, метода и модела којима се описује понашање и предвиђа век трајања адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења. На основу систематизованих теоријских поставки развијени су оригинални алгоритми којима се, обрадом улазних података добијених из експерименталних испитивања, одређују параметри приказаних модела. На основу развијених алгоритама написани су MATLAB програми који су коришћени за обраду експерименталних података.

Ради обраде експерименталних резултата испитивања века трајања развијени су оригинални алгоритми за одређивање параметара S-N кривих, и то:

- Методом максималне веродостојности, применом модела линеарне зависности логаритма силе и логаритма века трајања.
- Сендецкијевом методом, применом модела предложеног од стране истог аутора.

У овом сегменту развијен је и модел за предвиђање преостале чврстоће адхезионих спојева под дејством константног цикличног оптерећења. Развој модела је заснован на промени нормализоване разлике између преостале чврстоће и максималне силе у циклусу са порастом броја циклуса оптерећења, те је због тога назван „*модел нормализоване резерве чврстоће*“. Њиме се, на основу резултата испитивања преостале чврстоће при свега неколико нивоа оптерећења, може предвидети крива зависности преостале чврстоће и броја циклуса за произвољни ниво оптерећења, који није коришћен за одређивање параметара модела.

На основу модела нормализоване резерве чврстоће развијена је метода предвиђања века трајања спојева под дејством променљивог цикличног оптерећења. Ради валидације предложене методе применом експерименталних резултата из литературе, развијен је алгоритам за предвиђање века трајања узорака под дејством спектра оптерећења који представља понављање два блока различитих нивоа цикличног оптерећења.

Допринос дисертације у овом сегменту представља и развој методе за одређивање века трајања адхезионих спојева под дејством цикличног оптерећења константне амплитуде, на основу праћења промене њихове крутости са порастом броја циклуса оптерећења. Најзначајнија карактеристика развијене методе је де се за добијање експерименталних података за њену примену користи неразарајући поступак

испитивања. У овој методи промена крутости се изражава променом нагиба хистерезисне петље која се формира при дејству цикличног оптерећења на адхезионе спојеве. У ту сврху, развијен је посебан алгоритам за анализу излазног сигнала регистрованог при испитивању адхезионих спојева излагањем цикличном оптерећењу константне амплитуде. Њиме се најпре врши упрошћавање података о регистрованој сили и померању и, на основу упрошћеног скупа података, рачунају нагиб и површина хистерезисне петље.

Утицај цикличног оптерећења на понашање адхезионих спојева експериментално је истражен под дејством по синусном закону променљиве силе, константне амплитуде и степена асиметрије циклуса. Различитим експерименталним поступцима одређени су:

- век трајања и деформацијски одговор узорака при различитим нивоима цикличног оптерећења константне амплитуде и степена асиметрије циклуса;
- преостала чврстоћа након парцијалног замора при различитим нивоима цикличног оптерећења константне амплитуде и степена асиметрије циклуса.

На основу података експерименталног испитивања века трајања фасадних спојева спојених акрилним и полиуретанским адхезивом, применом развијених алгоритама и регресионе анализе, одређене су S-N криве којима је могуће предвидети век трајања фасадних спојева. На основу упоређења кривих добијених различитим методама, закључено је да су најбољи резултати за практичну примену добијени методом максималне веродостојности, која је при „средњим“ нивоима оптерећења резултовала за нијансу конзервативнијим предвиђањима од осталих метода. Поред тога, једино се овом методом при одређивању параметара S-N модела у обзир могу узети и подаци о „преживелим“ узорцима.

Упоређењем нормализованих S-N кривих узорака фасадних спојева, израђених од акрилног и полиуретанског адхезива, регистрована је већа отпорност на замор у случају акрилног адхезива. Динамичке чврстоће, одређене применом методе максималне веродостојности, биле су 32% и 25% статичке чврстоће спојева, у случају акрилног и полиуретанског адхезива, респективно. Са друге стране, у случају акрилног адхезива је регистрован виши степен расипања експерименталних резултата. За разлику од фасадних спојева, резултати испитивања века трајања двоструких

преклопних спојева израђених помоћу акрилног адхезива показали су нижи степен расипања.

Због веће отпорности на замор, за испитивање преостале чврстоће коришћени су узорци спојева израђени помоћу акрилног адхезива. На основу експерименталних резултата може се закључити да се код оба типа споја може регистровати такозвани „*sudden death*“ тип деградације чврстоће; односно незнатна деградација чврстоће током већег дела века трајања, праћена наглим ломом на самом крају. Међутим, у случају двоструких преклопних спојева регистрован је пораст чврстоће при фракцијама између 40% и 60% века трајања. Ова појава се у литератури приписује релаксацији и прерасподели напона у зонама високе концентрације, што је одлика дуктилних адхезива.

Предложеним моделом нормализоване резерве чврстоће не може се узети у обзир пораст чврстоће узорака, што представља његово ограничење. Због тога је валидација овог модела спроведена користећи резултате експерименталног испитивања адхезионих спојева алуминијумских адхерената, објављених у [91]. Регистровано је веома добро поклапање са експерименталним резултатима. Експериментални резултати истог истраживања су коришћени за валидацију предложене методе предвиђања века трајања под дејством променљивог цикличног оптерећења. Предложена метода, заснована на моделу нормализоване резерве чврстоће, је резултовала знатно бољим предвиђањима у односу на најчешће коришћену методу у доступној литератури (Палмгрен-Минерова метода кумулативног оштећења). При томе је закључено да се знатно тачнија предвиђања добијају уколико се у прорачуну узме у обзир утицај учесталости промене нивоа оптерећења на век трајања, применом тзв. *cycle mix* фактора.

Валидација предложене методе за предвиђање века трајања под дејством константног цикличног оптерећења је спроведена на подацима о деформацијском одговору узорака двоструког преклопног споја, добијеног испитивањем цикличним оптерећењем до лома. При томе су 3 узорка коришћена за одређивање параметара модела, док су преостала 4 узорка коришћена за валидацију методе, поређењем предвиђених векова трајања са експерименталним резултатима. Регистровано је здовољавајуће поклапање предвиђених и експерименталних векова трајања. На основу анализе утицаја промене густине експерименталних података и коришћеног сегмента



века трајања на тачност предвиђања, закључено је да предложена метода даје задовољавајуће резултате користећи релативно мали број података (11 података на сегменту од 22% века трајања), што методу карактерише као врло ефикасну.

7.2 Правци даљих истраживања

На основу прегледа литературе и резултата истраживања у оквиру ове дисертације могу се назначити различити правци будућих истраживања.

Први правац будућих истраживања је испитивање могућности формулисања нормализованог модела преостале чврстоће (или резерве чврстоће) којим се може предвидети пораст чврстоће у средишњем делу и нагли пад у последњем сегменту века трајања.

Ради примене предложеног модела нормализоване резерве чврстоће на стохастички променљиво циклично оптерећење, као следећи правац истраживања намеће се испитивање зависности његових параметара од промене вредности степена асиметрије циклуса.

Један од правца будућих истраживања је и испитивање могућности примене предложене методе деградације крутости адхезионих спојева на случај дејства променљивог цикличног оптерећења.

Испитивање могућности примене предложене методе деградације крутости на предвиђање лома адхезионих спојева под дејством дуготрајног статичког оптерећења, услед утицаја пузања адхезива, представља могући правац истраживања. У ту сврху се предлаже да се поред дуготрајног статичког оптерећења узорци периодично оптерећују одређеним бројем циклуса оптерећења. Тиме би се омогућило праћење промене крутости узорка, помоћу промене нагиба хистерезисне петље у току времена, и предвиђање трајности узорка. Уколико се ова метода покаже поузданом за предвиђање утицаја пузања на трајност адхезионих спојева, она би се могла применити на предвиђање њиховог понашања под утицајем комбинације дуготрајног статичког и цикличног оптерећења, што је честа појава у случају грађевинских конструкција.



8 ЛИТЕРАТУРА

- [1] European Organization for Technical Approvals (EOTA), Guideline for European technical approval for structural sealant glazing systems, Part1: Supported and unsupported systems 1999.
- [2] СРПС ЕН 1990:2012: Еврокод - Основе пројектовања конструкција.
- [3] Pasternak, H., Ciupack, Y., Development of Eurocode-based design rules for adhesive bonded joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 53, 2014, pp. 97–106. doi:10.1016/j.ijadhadh.2014.01.011.
- [4] I. J. van Straalen, Drafting Design Rules for Adhesive Joints in Thin-Gauge Steel Sheeting. Work. Model. Sandw. Struct. Adhes. Bond. Joints, Porto, 1998, p. 55–68.
- [5] I. J. van Straalen, Development of Design Rules for Structural Adhesive Bonded Joints - A Systematic Approach, Ph.D. thesis., Delft University of Technology, The Netherlands, 2001.
- [6] Adams, R.D., Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2005.
- [7] History of Adhesives. BSA-Educational Services Committee ESC, ESC report, Vol. 1, Nr. 2, pp. 1-4, 1991.
- [8] Pizzi, A., Mittal, K.L., Handbook of Adhesive Tehnology. Marcel and Dekker, New York, 1994.
- [9] Engineers, S., Guide to the Structural Use of Adhesives. The Institution of Structural Engineers, London, 1999.
- [10] Pasternak, H., Meinz, J., Adhering in Steel Construction-Advantages and Possibilities. Proc. 9th Int. Conf. Mod. Build. Mater. Struct. Tech., 2007, pp. 1–10.
- [11] Petrie, E.M., Handbook of Adhesives and Sealants. McGraw-Hill, New York, 2000.
- [12] Sahellie, S., Study on the Temperature Effect on Lap Shear Adhesive Joints in Lightweight Steel Construction, Ph.D. thesis., Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, 2015.
- [13] Habenicht, G., Applied Adhesive Bonding. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009.
- [14] СРПС ЕН ИСО 10365:2011: Адхезиви - Означавање образаца главних ломова.
- [15] EAA Aluminium Automotive Manual – Joining. Eur. Alum. Assoc., European Aluminium Association, 2015.
- [16] Adhesives for Hard-to-bond Substrates & Clean Surfaces Require Surface Treatment <http://www.cyberbond1.com/blog/p.150831000/adhesives-for-hard-to-bond-substrates-clean-surfaces-require-surface-treatment/> (приступљено 06.05.2017).



- [17] Zielecki, W., Pawlus, P., Perłowski, R., Dzierwa, A., Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pre-treatment. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 13, 2013, pp. 175–85. doi:10.1016/j.acme.2013.02.005.
- [18] Rotella, G., Alfano, M., Schiefer, T., Jansen, I., Enhancement of static strength and long term durability of steel / epoxy joints through a fiber laser surface pre-treatment Vol. 63, 2015, pp. 87–95. doi:10.1016/j.ijadhadh.2015.08.009.
- [19] Wegman, F., Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding. Noyes Publications, New Jersey, 1989.
- [20] Cognard, P., Equipment for the Application of Adhesives and Sealants: Mixing, Metering, Coating or Applying the Adhesives. In: Cognard P, editor. Adhes. Sealants Gen. Knowledge, Appl. Tech. New Curing Tech., 2006.
- [21] Broughton, B., Gower, M., Preparation and Testing of Adhesive Joints. Teddington,
- [22] New toughening technology for weight savings - Henkel <http://www.henkel-adhesives.com/aerospace/weight-reduction-news-26832-mp-news-new-toughening-technology-for-weight-savings-35286.htm> (приступљено 06.05.2017).
- [23] John Hil, Adhesive Bonded Structural Composites <http://maybach300c.blogspot.rs/2012/11/aston-martin.html> (приступљено 06.05.2017).
- [24] Custodio, J., Materials for Construction and Civil Engineering. Springer International Publishing, Heidelberg, 2015. doi:10.1007/978-3-319-08236-3.
- [25] Floor, J.H.J., Structural Adhesive Bonded Steel-to-Steel Connections: An Introduction for Structural Engineering, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 2014.
- [26] Pasternak, H., Meinz, J., Kleben im Stahlbau – zwei Beispiele aus dem Fassadenbau. Bauingenieur, Vol. 82, 2007, pp. 115–24.
- [27] Meinz, J., Kleben im Stahlbau- Betrachtungen zum Trag- und Verformungsverhalten und zum Nachweis geklebter Trapezprofilanschlüsse und verstärkter Hohlprofile in Pfosten-Riegel- Fassaden, Ph.D. thesis, BTU-Cottbus, 2010.
- [28] Wang, J., Rider, a. N., Heller, M., Kaye, R., Theoretical and experimental research into optimal edge taper of bonded repair patches subject to fatigue loadings. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 25, 2005, pp. 410–426. doi:10.1016/j.ijadhadh.2004.11.007.
- [29] da Silva, L.F.M., Carbas, R.J.C., Critchlow, G.W., Figueiredo, M.A. V, Brown, K., Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 29, 2009, pp. 621–632. doi:10.1016/j.ijadhadh.2009.02.012.
- [30] Arenas, J.M., Narbón, J.J., Alía, C., Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on Weibull distribution. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 30, 2010, pp. 160–165. doi:10.1016/j.ijadhadh.2009.12.003.
- [31] Diharjo, K., Anwar, M., Tarigan, R.A.P., Rivai, A., Effect of adhesive thickness and surface treatment on shear strength on single lap joint Al/CFRP using adhesive of epoxy/Al fine powder. AIP Conference Proceedings, Vol. 1710, 2016, pp. 1–8. doi:10.1063/1.4941496.



- [32] Eskandarian, M., Rousseau, N., Hamel, F., On the Influence of Joint Geometry and Adhesive Bulk Properties on Quasistatic Performance of Lap-Shear Joints. Proc. 34th Annu. Meet. Adhes. Soc., The Adhesion Society, Savannah, Georgia, USA, 2011, p. 1–3.
- [33] Davies, P., Sohier, L., Cognard, J.Y., Bourmaud, A., Choqueuse, D., Rinnert, E., et al., Influence of adhesive bond line thickness on joint strength. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 29, 2009, pp. 724–736. doi:10.1016/j.ijadhadh.2009.03.002.
- [34] Kubit, A., Ciecńska, B., Drozd, K., the Influence of Lap Size on Shear Strength of Adhesive Joints. Advances in Science and Technology Research Journal, Vol. 9, 2015, pp. 104–108. doi:10.12913/22998624/2372.
- [35] Cidlina, J., Muller, M., Influence of overlapping length on peeling strength of adhesive bonds. Engineering for Rural Development, Vol. 14, 2015, pp. 761–765.
- [36] Hart-Smith, L.J., Adhesive-Bonded Double Lap Joints, NASA CR 112235, Langley Research Center. Hampton, Virginia, USA,
- [37] Adams, R.D., Wake, W.C., Structural Adhesive Joints in Engineering. Elsevier Applied Science Publishers LTD, Essex, 1986.
- [38] Kovačević, D., Petryna, Y., Petronijević, M., Assessment of the impact of air voids on adhesive joints in rotor blades by use of NDT and FEA, 2016, p. 5–8.
- [39] Grant, L.D.R., Adams, R.D., da Silva, L.F.M., Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 29, 2009, pp. 405–413. doi:10.1016/j.ijadhadh.2008.09.001.
- [40] Pujol, S., Multi-Material Adhesive Joining in the Automotive Sector. In: Moreira PMGP, Silva LFM da, Castro PMST de, editors. Struct. Connect. Light. Met. Struct., Vol. 5, Springer-Verlag, Heidelberg, 2012. doi:10.1007/978-3-642-14673-2.
- [41] Chester, R.J., Roberts, J.D., Void minimization in adhesive joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 9, 1989, pp. 129–138. doi:10.1016/0143-7496(89)90107-3.
- [42] Grant, L.D.R., Adams, R.D., da Silva, L.F.M., Effect of the temperature on the strength of adhesively bonded single lap and T joints for the automotive industry. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 29, 2009, pp. 535–542. doi:10.1016/j.ijadhadh.2009.01.002.
- [43] Gan, L.M., Ong, H.W.K., Tan, T.L., Surface Treatment of Cold Rolled Steel by Phosphating. The Journal of Adhesion, Vol. 16, 1984, pp. 233–244. doi:10.1080/00218468408074918.
- [44] Critchlow, G., Webb, P., Tremlett, C., Brown, K., Chemical conversion coatings for structural adhesive bonding of plain carbon steels. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 20, 2000, pp. 113–122. doi:10.1016/S0143-7496(99)00036-6.
- [45] Rudawska, A., Selected aspects of the effect of mechanical treatment on surface roughness and adhesive joint strength of steel sheets. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 50, 2014, pp. 235–243. doi:10.1016/j.ijadhadh.2014.01.032.
- [46] Viana, G., Costa, M., Banea, M., da Silva, L., A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints. Proceedings of the Institution of Mechanical



- Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 0, 2016, pp. 1–14. doi:10.1177/1464420716671503.
- [47] Carbas, R.J.C., Marques, E.A.S., da Silva, L.F.M., Lopes, A.M., Effect of Cure Temperature on the Glass Transition Temperature and Mechanical Properties of Epoxy Adhesives. The Journal of Adhesion, Vol. 90, 2014, pp. 104–119. doi:10.1080/00218464.2013.779559.
- [48] Carbas, R.J.C., da Silva, L.F.M., Marques, E. a S., Lopes, a M., Effect of post-cure on the glass transition temperature and mechanical properties of epoxy adhesives. Journal of Adhesion Science & Technology, Vol. 27, 2013, pp. 2542–2557. doi:10.1080/01694243.2013.790294.
- [49] Zhang, Y., Adams, R.D., da Silva, L.F.M., Effects of Curing Cycle and Thermal History on the Glass Transition Temperature of Adhesives. The Journal of Adhesion, Vol. 90, 2014, pp. 327–345. doi:10.1080/00218464.2013.795116.
- [50] Banea, M.D., da Silva, L.F.M., The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, Vol. 224, 2010, pp. 51–62. doi:10.1243/14644207JMDA283.
- [51] Sahellie, S., Pasternak, H., Temperature effect on mechanical behaviour of adhesive bonded steel joints under short and long-term loading. Proc. 13th Int. Sci. Conf. VSU'13, Vol 2, 2013, p. 7–12.
- [52] Sugiman, S., Crocombe, A.D., Ashcroft, I.A., Modelling the static response of unaged adhesively bonded structures. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 98, 2013, pp. 296–314. doi:10.1016/j.engfracmech.2012.10.014.
- [53] McCarthy, J., MTS Adhesives Project 2: Failure modes and criteria — Report No.7 — Overall Summary. Document AEAT-0122, 1996.
- [54] Crocombe, A.D., Kinloch, A.J., Task 1: Detailed study of joint failure - MTS Adhesive Project 2: Failure modes and criteria - Report no. 1: Review of adhesive bondfailure criteria, AEA-ESD-OI07, 1994.
- [55] Silva, L.F.M. da, Dillard, D.A., Blackman, B., Adams, R.D., Testing Adhesive Joints, Best Practices. Wiley-VCH Verlag & Co., Weinheim, 2012. doi:10.1002/9783527647026.
- [56] Dean, G., Crocker, L., The use of finite element methods for design with adhesives. Measurement Good Practice Guide No. 48, NPL Materials Centre, Teddington, 2001.
- [57] San Román, J.D.C., Experiments on Epoxy, Polyurethane and ADP Adhesives: Composite construction laboratory, Technical Report Nr. CCLab2000.1b/1. 2005.
- [58] da Silva, L.F.M., Öchsner, A., Modeling of Adhesively Bonded Joints. Springer-Verlag, Heidelberg, 2008.
- [59] Sahellie, S., Pasternak, H., Concentration of the normal stresses in the adherends of adhesively bonded double lap steel joints due to reducing the width of the bonded area. Proc. 14th Int. Sci. Conf. VSU'14, Vol. 2, 2014, pp. 197–202.
- [60] Sahellie, S., Pasternak, H., Epoxy- and acrylic-bonded joints for strengthening lightweight steel girders. Stahlbau, Vol. 84, 2015p pp. 577–583. doi:10.1002/stab.201510294.

- [61] Pereira, A.M., Ferreira, J.M., Antunes, F. V., Bártolo, P.J., Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, 2010, pp. 610–617. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.11.006.
- [62] Swift, H.W., Plastic instability under plane stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 1, 1952, pp. 1–18. doi:10.1016/0022-5096(52)90002-1.
- [63] Kumar, S., Pandey, P.C., Behaviour of Bi-adhesive Joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 24., No. 7, 2010, pp. 1251-1281. doi:10.1163/016942409X12561252291982.
- [64] Sayman, O., Arikan, V., Dogan, A., Soykok, I.F., Multi-linear stress analysis in adhesively bonded double-lap joint. *Journal of Composite Materials*, Vol. 48, 2014, pp. 1497–1504. doi:10.1177/0021998313487936.
- [65] Dilger, K., Pasternak, H., IGF-Projekt Nr. 16494 BG: Entwicklung eines Eurocode-basierten Bemessungskonzepts für Klebverbindungen im Stahlbau. 2012.
- [66] Stojković, N., Ledecký, L., Ciupack, Y., Pasternak, H., Mette, C., Stammen, E., et al., Tensile Strength of Adhesively Bonded Façade Joints. *Proc. VI Int. Conf. Civ. Eng. – Sci. Pract.*, Žabljak, Montenegro, 2016, pp. 273–80.
- [67] Hart-Smith, L.J., *Advances in the Analysis and Design of Adhesive-Bonded Joints in Composite Aerospace Structures*. SAMPE Proc. SAMPE, Azusa, 1974.
- [68] Tsai, M.Y., Morton, J., An investigation into the stresses in double-lap adhesive joints with laminated composite adherends. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, 2010, pp. 3317–3325. doi:10.1016/j.ijsolstr.2010.08.011.
- [69] Silva, L.F.M. da, Dillard, D. a., Blackman, B., Adams, R.D., *Testing Adhesive Joints, Best Practices*. Wiley-VCH Verlag & Co., Weinheim, 2012. doi:10.1002/9783527647026.
- [70] СРПС ЕН 1489-2:2012: Адхезиви за конструкције — Одређивање понашања веза конструкције при смицању — Део 2: Испитивање на смицање дебелих адхерената.
- [71] Howdyshell, P.A., Trovillion, J.C., GangaRao, H.V.S., Lopez-Anido, R., *Construction Productivity Advancement Research (CPAR) Program: Development and Demonstration of Advanced Design Composite Structural Component*. 1998.
- [72] СРПС ЕН 10346:2016: Пљоснати производи од челика за хладно обликовање са превлаком нанесеном континуираним поступком топлог урањања - Технички захтеви за испоруку.
- [73] СРПС ЕН ИСО 25178-6:2013: Геометријске спецификације производа (ГПС) - Површинске екстуре: Површина - Део 6: Класификација метода мерења површинских текстура.
- [74] СРПС ЕН ИСО 4287:2014: Геометријска спецификација производа (ГПС) - Површинска текстура: Метода профила - Термини дефиниције и параметри површинске текстура.
- [75] Roughness (3D) parameter | Olympus IMS http://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/3d_parameter/ (приступљено 23.04.2017).



- [76] Foister, R.T., Adhesive Bonding to Galvanized Steel: II. Substrate Chemistry, Morphology and Bond Failure Analysis. *The Journal of Adhesion*, Vol. 24, 1987: pp. 279–313. doi:10.1080/00218468708075433.
- [77] Mainz, J., Kleben im Stahlbau – Betrachtungen zum Trag- und Verformungsverhalten und zum Nachweis geklebter Trapezprofilanschlüsse und verstärkter Hohlprofile in Pfosten-Riegel-Fassaden, Ph.D. thesis., BTU Cottbus, 2010.
- [78] Ledecký, L., Stojković, N., Pasternak, H., Mette, C., Stammen, E., Dilger, K., Adhesively bonded facade joint under cyclic service loading. *Proc. 15th Int. Sci. Conf. VSU'15*, Vol. 1, Sofia, 2015, pp. 103–108.
- [79] Crocombe, A.D., Richardson, G., Assessing stress state and mean load effects on the fatigue response of adhesively bonded joints Vol. 19, 1999: pp. 19–27.
- [80] Datla, N.V., Ameli, a., Azari, S., Papini, M., Spelt, J.K., Effects of hygrothermal aging on the fatigue behavior of two toughened epoxy adhesives. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 79, 2012, pp. 61–77. doi:10.1016/j.engfracmech.2011.10.002.
- [81] СРПС ЕН 15870:2009: Адхезиви - Одређивање затезне чврстоће чеоних спојева.
- [82] Öchsner, A., Stasiak, M., Mishuris, G., Grácio, J., A new evaluation procedure for the butt-joint test of adhesive technology: Determination of the complete set of linear elastic constants. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 27, 2007, pp. 703–711. doi:10.1016/j.ijadhadh.2006.12.003.
- [83] СРПС ЕН ИСО 6892-1:2012: Метални материјали - Испитивање затезањем - Део 1: Метода испитивања на собној температури.
- [84] UNIPHIZ Lab, Graphing, Digitizing and Curve Fitting Software FindGraph
- [85] Öchsner, A., Gegner, J., Critical analysis of the substrate deformation correction in the thick-adherend tensile-shear test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 24, 2004, pp. 37–41. doi:10.1016/S0143-7496(03)00098-8.
- [86] ABAQUS, Analysis Users Manual Online Documentation (Version 6.14). Dassault C. Providence, RI, USA, 2014.
- [87] Nicholas, T., High Cycle Fatigue: A Mechanics of Materials Perspective. Elsevier Ltd., 2006.
- [88] ASTM D3166 - 99(2012): Standard Test Method for Fatigue Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal/Metal)
- [89] DIN EN ISO 9664:1995-08: Adhesives - Test methods for fatigue properties of structural adhesives in tensile shear
- [90] D.W., O., Stress Analysis of Composite Joints. *Proc. 4th Army Mater. Technol. Conf.*, Brook Hill Publishing Co., Newton MA, 1975, pp. 405–51.
- [91] Shenoy, V., Ashcroft, I.A., Critchlow, G.W., Crocombe, A.D., Abdel Wahab, M.M., An evaluation of strength wearout models for the lifetime prediction of adhesive joints subjected to variable amplitude fatigue. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 29, 2009, pp. 639–649. doi:10.1016/j.ijadhadh.2009.02.008.
- [92] Wöhler, A., Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl (On Strength Tests of Iron and Steel). *Zeitschrift Für Bauwesen*, Vol. 20, 1870, pp. 73–106.
- [93] Basquin, O.H., The exponential law of endurance tests, *Proceedings - American*



- Society for Testing Materials. Proceedings - American Society for Testing Materials, Vol. 10, 1919, pp. 625–630.
- [94] Och, F., Fatigue Strength. AGARD-AG-292, Helicopter Fatigue Des. Guid., 1983, p. 109–132.
- [95] Sarfaraz, R., Vassilopoulos, A.P., Keller, T., A hybrid S – N formulation for fatigue life modeling of composite materials and structures. Composites: Part A, Vol. 43, 2012, pp. 445–453. doi:10.1016/j.compositesa.2011.11.008.
- [96] Sendeckyj, G.P., Fitting Models to Composite Materials Fatigue Data. In: Chamis CC, editor. Test Methods Des. Allow. Fibrous Compos. ASTM STP 734, American Society for Testing and Materials, 1981, pp. 245–260.
- [97] Vassilopoulos, A.P., Nijssen, R.P.L., Fatigue life prediction of composite materials under realistic loading conditions (variable amplitude loading). Fatigue life Predict. Compos. Compos., Woodhead Publishing Ltd., Oxford, 2010, pp. 293–333. doi:10.1007/978-1-84996-181-3_4.
- [98] Sivák, P., Ostertagová, E., Evaluation of Fatigue Tests by Means of Mathematical Statistics. Procedia Engineering, Vol. 48, 2012, pp. 636–642. doi:10.1016/j.proeng.2012.09.564.
- [99] Spindel, J.E., Haibach, E., The method of maximum likelihood applied to the statistical analysis of fatigue data. International Journal of Fatigue, Vol. 1, 1979, pp. 81–88.
- [100] Philippidis, T.P., Passipoularidis, V.A., Residual strength after fatigue in composites: Theory vs. experiment. International Journal of Fatigue, Vol. 29, 2007, pp. 2104–2116. doi:10.1016/j.ijfatigue.2007.01.019.
- [101] Gerber, W.Z., Bestimmung der zulässigen spanungen in eisen constructionen. Zeitschrift Des Bayerischen Architekten-Und Ingenieur-Vereins, Vol. 6, 1874, pp. 101–110.
- [102] Goodman, J., Mechanics Applied to Engineering. Longman, Green & Company, London, 1930.
- [103] Haigh, B.P., The relative safety of mild and high-tensile alloy steels under alternating and pulsating stresses. Proceedings of the Institution of Automobile Engineers, Vol. 24, 1930: pp. 320–47.
- [104] Kumar, S., Pandey, P.C., Fatigue life prediction of adhesively bonded single lap joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 31, 2011, pp. 43–47. doi:10.1016/j.ijadhadh.2010.10.002.
- [105] Coffin, L.F., A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 76, 1954, pp. 931–950.
- [106] Manson, S.S., Behaviour of materials under conditions of thermal stress, REPORT 1170. Cleveland, 1954.
- [107] Ince, A., Glinka, G., Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures A modification of Morrow and Smith – Watson – Topper mean stress 2011, pp. 854–867. doi:10.1111/j.1460-2695.2011.01577.x.



- [108] Neuber, H., Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 28, 1961, pp. 544–550.
- [109] Erpolat, S., Variable Amplitude Fatigue of Adhesively Bonded Joints, Ph.D. thesis., Loughborough University, 2004.
- [110] Wahab, M.M.A., Hilmy, I., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D., Evaluation of Fatigue Damage in Adhesive Bonding : Part 1 : Bulk Adhesive Vol. 24, 2010, pp. 305–324. doi:10.1163/016942409X12508517390798.
- [111] Lemaitre, J., A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, 1985, pp. 83–89.
- [112] Kachanov, L.M., Introduction to continuum damage mechanics. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986.
- [113] Спасић, Д.М., Нумеричко моделовање ударних оштећења ваздухопловних структура, Докторска теза., Универзитет у Београду, Београд, 2015.
- [114] Wahab, M.M.A., Ashcroft, I.A., Shaw, S.J., Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics. *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 15, 2001, pp. 763–781. doi:10.1163/15685610152540830.
- [115] Abdel Wahab, M.M., Hilmy, I., Hojjati-Talemi, R., On the Use of Low and High Cycle Fatigue Damage Models. *Key Engineering Materials*, Vol. 569–570, 2013, pp. 1029–1035. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.569-570.1029.
- [116] Hilmy, I., Abdel Wahab, M.M., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D., Measuring of Damage Parameters in Adhesive Bonding. *Key Engineering Materials*, Vol. 324–325; 2006, pp. 275–278. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.324-325.275.
- [117] Imanaka, M., Hamano, T., Morimoto, A., Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive Vol. 17; 2003, pp. 981–994.
- [118] D’Amore, A., Giorgio, M., Grassia, L., Modeling the residual strength of carbon fiber reinforced composites subjected to cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, Vol. 78; 2015, pp. 31–37. doi:10.1016/j.ijfatigue.2015.03.012.
- [119] Revuelta, D., Cuartero, J., Miravete, A., Clemente, R., New approach to fatigue analysis in composites based on residual strength degradation. *Composite Structures*, Vol. 48; 2000, pp. 183–186. doi:10.1016/S0263-8223(99)00093-8.
- [120] Shenoy, V., Ashcroft, I.A., Critchlow, G.W., Crocombe, A.D., Abdel Wahab, M.M., Strength wearout of adhesively bonded joints under constant amplitude fatigue. *International Journal of Fatigue*, Vol. 31; 2009, pp. 820–830. doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.11.007.
- [121] Broutman, L., Sahu, S., A new theory to predict cumulative fatigue damage in fiberglass reinforced plastics. *Composite Materials: Testing and Design (2nd Conference)*, 1972, pp. 170–188.
- [122] Yang, J.N., Liu, M.D., Residual Strength Degradation Model and Theory of Periodic Proof Tests for Graphite/Epoxy Laminates. *Journal of Composite Materials*, Vol. 11; 1977, pp. 176–203.



- [123] Adam, T., Dickson, R.F., Jones, C., Reiter, H., Haris, B., A Power Law Fatigue Damage Model for Fibre-Reinforced Plastic Laminates. Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci., Vol. 200, 1986, pp. 155–166. doi:DOI: 10.1243/PIME_PROC_1986_200_111_02.
- [124] Schaff, J.R., Davidson, B.D., Life Prediction Methodology for Composite Structures. Part I--Constant Amplitude and Two-Stress Level Fatigue. Journal of Composite Materials, Vol. 31; 1997, pp. 128–157. doi:10.1177/002199839703100202.
- [125] Chou PC. and Croman R., Degradation and sudden-death models of fatigue of graphite/epoxy composites. Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conf), ASTM STP 674, 1979, pp. 431–454.
- [126] Post, N.L., Case, S.W., Lesko, J.J., Modeling the variable amplitude fatigue of composite materials: A review and evaluation of the state of the art for spectrum loading. International Journal of Fatigue, Vol. 30; 2008, pp. 2064–2086. doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.07.002.
- [127] Ferreira, J.A., Reis, P., Costa, J.D., Richardson, M.O., Fatigue behaviour of composite adhesive lap joints. Composites Science and Technology, Vol. 62; 2002, pp. 1373–1379. doi:10.1016/S0266-3538(02)00082-9.
- [128] Zhang, Y., Vassilopoulos, A.P., Keller, T., Stiffness degradation and fatigue life prediction of adhesively-bonded joints for fiber-reinforced polymer composites. International Journal of Fatigue, Vol. 30; 2008, pp. 1813–1820. doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.02.007.
- [129] Olajide, S.O., Arhatari, B.D., Recent progress on damage mechanisms in polymeric adhesively bonded high-performance composite joints under fatigue. International Journal of Fatigue, Vol. 95; 2017, pp. 45–63. doi:10.1016/j.ijfatigue.2016.10.009.
- [130] Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile im Fahrzeugbau bei schwingender Beanspruchung, Forschungsvorhaben P 653 / IGF-Nr. 141 ZN. Düsseldorf, 2012.
- [131] Whitworth, H.A., A stiffness degradation model for composite laminates under fatigue loading. Composite Structures, Vol. 40; 1997, pp. 95–101. doi:10.1016/S0263-8223(97)00142-6.
- [132] Rohatgi, A., WebPlotDigitizer
- [133] Erpolat, S., A study of adhesively bonded joints subjected to constant and variable amplitude fatigue. International Journal of Fatigue, Vol. 26; 2004, pp. 1189–1196. doi:10.1016/j.ijfatigue.2004.03.011.
- [134] Ashcroft, I.A., A simple model to predict crack growth in bonded joints and laminates under variable-amplitude fatigue. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 39; 2004, pp. 707–716. doi:10.1243/0309324042379239.
- [135] Gomatam, R.R., Sancaktar, E., A novel cumulative fatigue damage model for electronically-conductive adhesive joints. Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 20; 2006, pp. 69–86.
- [136] Miner, M.A., Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics, Vol. 67; 1945, pp. A159–A164.
- [137] Lotsberg, I., Fatigue Assessment Based on Stress Range Distributions. Fatigue Des.



- Mar. Struct., 2016, pp. 310–326. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9781316343982.012>.
- [138] Eftekhari, M., Fatemi, A., Variable amplitude fatigue behavior of neat and short glass fiber reinforced thermoplastics Vol. 98; 2017, pp. 176–186.
- [139] Bolchoun, A., Baumgartner, J., Kaufmann, H., A new method for fatigue life evaluation under out-of-phase variable amplitude loadings and its application to thin-walled magnesium welds. *International Journal of Fatigue*, 2017, pp. 1–10. doi:10.1016/j.ijfatigue.2017.01.012.
- [140] Leve, H.L., Cumulative damage theories. *Met. Fatigue Theory Des.*, John Wiley Sons, Inc., New York, 1969, pp. 170–203.
- [141] Sadananda, K., Vasudevan, A.K., Holtz, R.L., Lee, E.U., Analysis of overload effects and related phenomena. *International Journal of Fatigue*, Vol. 21; 1999, pp. 233–246. doi:10.1016/S0142-1123(99)00094-8.
- [142] Borrego, L.P., Ferreira, J.M., Pinho da Cruz, J.M., Costa, J.M., Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70; 2003, pp. 1379–1397. doi:10.1016/S0013-7944(02)00119-4.
- [143] Tvergaard, V., Overload effects in fatigue crack growth by crack-tip blunting. *International Journal of Fatigue*, Vol. 27; 2005, pp. 1389–1397. doi:10.1016/j.ijfatigue.2005.06.003.
- [144] Erpolat, S., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D., Abdel Wahab, M.M., Fatigue crack growth acceleration due to intermittent overstressing in adhesively bonded CFRP joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35; 2004, pp. 1175–1183. doi:10.1016/j.compositesa.2004.03.002.
- [145] Marco, S.M., Starkey, W.L., A concept of fatigue damage. *Transaction ASME*, Vol. 76; 1954, pp. 627–632.
- [146] Stojković, N., Pasternak, H., Fatigue of adhesively bonded structural elements - residual strength models. *Proc. 14th Int. Sci. Conf. VSU'14*, Vol. 2, Sofia, 2014, pp. 34–39.
- [147] Schaff, J.R., Davidson, B.D., Life Prediction Methodology for Composite Structures. Part II--Spectrum Fatigue. *Journal of Composite Materials*, Vol. 31; 1997, pp. 158–181. doi:10.1177/002199839703100203.
- [148] Farrow, I.R., Damage accumulation and degradation of composite laminates under aircraft service loading assessment and prediction, Ph.D. thesis., Cranfield Institute of Technology, 1989.
- [149] Khoramishad, H., Modelling fatigue damage in adhesively bonded joints, Ph.D. thesis., 2010.
- [150] Shenoy, V., Damage Characterisation and Lifetime Prediction of Bonded Joints under Variable Amplitude Fatigue Loading, Ph.D. thesis, Loughborough University, 2009.
- [151] M. R. L. Gower, Shaw, R.M., Sims, G.D., Good Practice Guide for the Assessment of Damage Tolerance Under Long-Term Loading. *Measurement Good Practice Guide No101*, 2007.
- [152] Spearing, S.M., Beaumont, P.W.R., Ashby, M.F., Fatigue damage mechanics of composite materials. II: A damage growth model. *Composites Science and*



- Technology, Vol. 44; 1992, pp. 169–177. doi:10.1016/0266-3538(92)90110-O.
- [153] Reifsnider, K.L., The critical element model: A modeling philosophy. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 25; 1986, pp. 739–749. doi:10.1016/0013-7944(86)90037-8.
- [154] Shokrieh, M.M., Lessard, L.B., Progressive Fatigue Damage Modeling of Composite Materials, Part II: Material Characterization and Model Verification. *Journal of Composite Materials*, Vol. 34; 2000, pp. 1081–1116. doi:<https://doi.org/10.1177/002199830003401302>.
- [155] Fang, G., Gao, X., Zhang, S., Xue, J., Song, Y., Wang, F., A residual strength model for the fatigue strengthening behavior of 2D needled CMCs. *International Journal of Fatigue*, Vol. 80; 2015, pp. 298–305. doi:10.1016/j.ijfatigue.2015.06.019.
- [156] Critchlow, G., Ashcroft, I., Cartwright, T., Bahrani, D., Anodising aluminium alloy. UK patent No. GB 3421959A,
- [157] Hansen, P.C., Pereyra, V., Sherer, G., *Least Squares Data Fitting with Applications*. John Hopkins University Press, Baltimore, 2012.

9 БИОГРАФИЈА АУТОРА

Ненад Стојковић, дипломирани инжењер грађевинарства, рођен је 03.05.1984. године у Ћуприји. Основну и средњу школу завршио је у Ћуприји.

Грађевинско-архитектонски факултет Универзитета у Нишу, уписао је 2002. године. Дипломске студије на конструкторском смеру грађевинског одсека завршио је 2009. године са просечном оценом 9,12 и одбрањеним дипломским радом из предмета Спрегнуте и специјалне конструкције, са оценом 10. Школске 2008/09. године проглашен је за најбољег дипломираног студента на грађевинском одсеку Грађевинско-архитектонског факултета у Нишу.

Уписао је докторске академске студије на Грађевинско-архитектонском факултету у Нишу школске 2009/10. године. Од 2010. до 2012. год. био је стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије и учесник два пројекта технолошког развоја, које је финансирао Министарство.

Од 2012. године стипендиста је DAAD у оквиру пројекта SEEFORM (South East European Graduate School for Master and PhD Formation). У периоду од 2013. до 2016. године, у оквиру SEEFORM пројекта, провео је 9 месеци на студијском боравку у Немачкој, на Катедри за челичне и дрвене конструкције Грађевинског факултета Бранденбуршког техничког универзитета Котбус-Зенфтемберг, где је спровео део истраживања из области докторске дисертације.

Аутор је и коаутор већег броја научних и стручних радова и то: 2 рада у међународним часописима са SCI листе (1 рад у часопису категорије M21, а други у часопису категорије M23), један рад у часопису категорије M24 и 9 радова у зборницима са међународних научно-стручних скупова.

Као сарадник радио је на већем броју пројеката конструкције архитектонских објеката.

Члан је Инжењерске коморе Србије и поседује лиценце одговорног пројектанта и извођача радова грађевинских конструкција објеката високоградње, нискоградње и хидроградње.

Од маја 2012. запослен је као асистент на Високој техничкој школи струковних студија у Нишу.

Говори енглески и немачки језик. Ожењен је, отац једног детета.

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

"Истраживање понашања адхезионих спојева металних конструкција под дејством статичког и цикличног оптерећења"

која је одбрањена на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу.

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:

Ненад В. Стојковић

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације: **"Истраживање понашања адхезионих спојева металних
конструкција под дејством статичког и цикличног оптерећења"**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за
уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:

Ненад В. Стојковић

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

"Истраживање понашања адхезионих спојева металних конструкција под дејством статичког и цикличног оптерећења"

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)⁷

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:

Ненад В. Стојковић