

FTAMP 67.07.11

Д.А. Оканов¹ – негізгі автор, | ©
А.А. Брянцев², С.Е. Ниетбай³, Ж.Н. Молдамуратов⁴



¹Докторант, ассистент-профессор, ²PhD, зерттеуші қауымдас. профессор,
³PhD, ⁴PhD

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0001-9645-3140> ²<https://orcid.org/0000-0002-6932-8202>
³<https://orcid.org/0000-0002-9748-6830> ⁴<https://orcid.org/0000-0002-4573-1179>



^{1,2,3,4}Халықаралық білім беру корпорациясы,



Алматы қ., Қазақстан



³s.nietbay@mok.kz

<https://doi.org/10.55956/VZLM7026>

ГОФРЛЕНГЕН ҚАБЫРҒАЛЫ КРАНАСТЫ АРҚАЛЫҚТАРДЫ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ КЕРНЕУ ТАЛДАУЫ

Аңдатпа. Бұл мақала кранасты арқалықтарындағы жазық қабырғаны гофрленген қабырғамен алмастыру мүмкіндігін зерттеуге арналған. Зерттеу барысында қабырға пішінінің екі түріндегі кернеу жағдайына талдау жүргізіліп, гофрленген қабырғалардың ерекшеліктері мен артықшылықтары анықталды. Мақалада гофрленген құрылымның жазық қабырғаны тиімді алмастыра алатыны, оның беріктік, қатаңдық, көтергіштік және тұрақтылық қасиеттерін арттырып, жүктеме әсерінен дәнекер тігістерінің ажырауын болдырмайтыны егжей-тегжейлі көрсетілген. Бұл әдісті таңдаудың себептері мен оны өнеркәсіптік жағдайда қолдану мүмкіндіктері жан-жақты қарастырылады. Зерттеу аясында компьютерлік эксперимент жүргізіліп, онда Tonus постпроцессоры бар SCAD бағдарламалық кешені және Лира-САПР 2022 бағдарламасы қолданылды. Эксперимент кезеңдері нақты экспериментке негізделген арқалық моделінің соңғы элементтік үлгісін құруды, Tonus постпроцессорында әртүрлі қабырға пішіндерінің геометриялық сипаттамаларын есептеуді, жазық және гофрленген қабырғалары бар үшөлшемді кранасты арқалықтарын модельдеуді, Лира-САПР 2022 бағдарламасында қабырғалардағы ең жоғарғы қалыпты және жанама кернеулерді анықтауды, жазық және гофрленген қабырғалы арқалықтардың нәтижелерін салыстыруды және алынған деректер негізінде қорытындыларды интерпретациялауды қамтыды. Авторлар бұл тәсілдің өнеркәсіптің әртүрлі салаларында қолдану әлеуетін атап өтіп, кранасты арқалықтарының қауіпсіздігі мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз етудегі маңыздылығын көрсетеді. Алынған нәтижелер болашақ зерттеулер мен өнеркәсіптік нысандарды жобалау және пайдалану барысында инновациялық шешімдерді енгізуге негіз бола алады.

Тірек сөздер: кранасты арқалық, жазық қабырға, гофрленген қабырға, статикалық жүктеме, көпір кран, көлденең күш, қалыпты кернеулер.



Оканов Д.А. Гофрленген қабырғалы кранасты арқалықтарды модельдеу және кернеу талдауы [Мәтін] / Д.А. Оканов, А.А. Брянцев, С.Е. Ниетбай, Ж.Н. Молдамуратов //Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2025. – №2(88). – Б.336-350. <https://doi.org/10.55956/VZLM7026>

Кіріспе. Зерттеудің негізгі мақсаты – үшбұрышты пішіндегі гофрленген қабырғалары бар дәнекерленген арқалықтардың деформациялану және жұмыс істеу ерекшеліктерін анықтау.

Зерттеу барысында келесі негізгі міндеттерді шешу қажет:

- үш түрлі жүктеме мәніне арналған ең тиімді қабырға түрін анықтау;
- гофраның ең тиімді параметрлерін белгілеу.

Гофрленген арқалық – бұл әртүрлі қималы металлдан жасалған сөрелері және көлденең бағытта иілген (гофрленген) қабырғасы бар арқалық. Мұндай арқалықтардың қабырғалары үшбұрышты, толқынды, трапециялы, тікбұрышты және т.б. профильді болуы мүмкін. Арқалық сөрелері болат прокатынан, пішінді профильдерден, электрмен дәнекерленген құбырлардан немесе темірбетон элементтерінен дайындалады. Гофрленген қабырғалы арқалықтар көптеген елдерде қолданылады.

Соңғы жылдары өндірістік ғимараттардың қарқынды салынуына байланысты кранасты арқалықтарға ерекше назар аударылуда. Олардың сенімділігі, беріктігі және тиімділігі өндірістік және логистикалық үдерістерді жақсартуға, сондай-ақ ауыр жүктемелермен жұмыс істеу кезінде қауіпсіздікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді [1]. Кранасты арқалық – бұл көпір кранының дөңгелектерінен түсетін жүктемені қабылдайтын көтергіш құрылым [2]. Сонымен қатар, кранасты конструкциялар рама жазықтығынан колонналарды байлау, тежеу жүктемелерінен және жел жүктемелерінен бойлық күштерді бағандар арасындағы тік байланыстарға беру, сейсмикалық және басқа да әсерлерді азайту арқылы бүкіл құрылымның үйлесімді жұмысын қамтамасыз етеді [3].

Ашық қолжетімді әдебиеттерде гофрленген қабырғалы кранасты арқалықтарды жобалау бойынша бірнеше шешімдер келтірілген.

Гофрленген қабырғалы дәнекерленген двутавр арқалықтың тиімділігі көтергіштік, беріктік, тұрақтылық және ұзақмерзімділік тұрғысынан жан-жақты зерттелген [4]. Арқалықтарды күшейту, кернеу-деформация күйі, әртүрлі әсерлер кезіндегі мінез-құлқы да зерттелуде. Гофрленген қабырғалар қолданылған қорапты қималы кранасты арқалықтар туралы еңбекте зерттелген [5].

Гофрленген және жазық қабырғалы двутавр арқалықтардың шаршау төзімділігі соңғы элементтер әдісімен салыстырылды. Нәтижесінде, гофрленген қабырға шаршау сипаттамалары мен төзімділігі бойынша әлдеқайда жоғары көрсеткіштер көрсетті. Зерттеуде гофрленген қабырға элементтерінің биіктігі, ұзындығы мен бұрышын өзгерту арқылы құрылымның шаршауға төзімділігі жүйелі түрде талданған. Сонымен қатар, гофра параметрлері мен болат шығыны, шаршауға төзімділік және экономикалық тиімділік ескеріліп, жобалау кезінде қолдануға болатын нұсқаулықтар ұсынылған [6].

Сонымен бірге, кранасты арқалық кез келген құрылым сияқты шешімін талап ететін мәселелерге ие. Статикалық және динамикалық жүктемелер әсерінен жоғарғы сөре мен дәнекер тігіс маңында жарықтар пайда болады. Тежеу құрылғыларының бекіту жіктері және колонналарға қосылатын түйін элементтері де зақымданады. Дайындау мен монтаж кезіндегі дәнекерлеу сапасының төмендігі, монтаж дәлсіздігі және рельстің кранасты арқалық осіне қатысты ығысуы бұл ақаулардың ерте пайда болуына әсер етеді [7].

Мақалада жазық қабырғаны гофрленген қабырғамен алмастыру арқылы дәнекерленген қосылыстардың сенімділігі мен құрылымдық тұрақтылығын арттыру мүмкіндігі зерттелген. Қабырға пішіндерінің екі түрі үшін кернеу

күйі талданып, гофрленген қабырғалардың артықшылықтары анықталған. Мақалада гофрланған құрылымның жүктемелер әсерінен дәнекер тігістерінің ажырауын қалай болдырмайтыны толық көрсетілген. Бұл әдістің таңдалу себептері мен өндірістік жағдайдағы қолдану мүмкіндіктері жан-жақты сипатталған [8].

Кейбір өндірістік ғимараттарда гофрленген қабырғалы кранасты арқалықтарды қолдану қажеттілігі туындайды, өйткені бұл олардың беріктігі мен тұрақтылығына елеулі әсер етеді. Жазық қабырғаға қарағанда, гофрленген қабырға арқасында болатты үнемдеу 20%-ға дейін жетеді, себебі қаттылық қабілеті жақсарып, қосымша қатандық беретін қабырға қабаттары қажет болмайды. Алайда, еңбектерінен басқа, гофрленген қабырғасы мен үшбұрышты гофры бар арқалықтар бойынша зерттеулер аз [9].

Қазақстан Республикасы мен Ресей Федерациясында ғылыми еңбектер мен нормативтік құжаттарда гофраның қалыңдығы, ұзындығы, тереңдігі және иілу диаметрі бойынша нақты түсіндірме болмағандықтан, осы параметрлердің кранасты арқалықтың деформациялануына әсерін зерттеу қажеттілігі туындайды. Бұл – жазық қабырғалы, қатайтқыш қабырғалары бар конструкцияны гофрленген, бірақ қатайтқышсыз қабырғаға балама ретінде ауыстыруға мүмкіндік береді [10].

Гофрленген қабырғаның жоғарғы сөреге қосылатын аймағындағы кернеу күйі – гофра түрі мен пішініне тәуелді, әрі қосымша зерттеуді қажет ететін өзекті мәселе [11].

Зерттеу шарттары мен әдістері. Бұл зерттеуде кранасты арқалықтардың физикалық, механикалық және экономикалық сипаттамаларын жақсарту мақсатында жазық қабырғаны гофрленген қабырғамен алмастыру мүмкіндігі қарастырылады.

Құрылымдық шешім ТМД елдері бойынша ғылыми зерттеулер мен нормативтік құжаттарда дәнекерленген I-бөлімді кранасты арқалықтарда гофрдің қалыңдығы, ұзындығы, тереңдігі мен иілу радиусы бойынша нақты түсіндірменің болмауына байланысты таңдалған [12,13].

Қазақстанда көлденең гофрленген қабырғалы арқалықтар көбіне үшбұрышты профильдегі гофрмен жасалады. Ал Швеция, Финляндия, АҚШ, Жапония және Нидерландыда трапециялы немесе тікбұрышты гофрлер, Австрия, Украина, Польша және Ресейде – синусоидалы гофр профильдері кеңінен қолданылады.

Қазақстанда трапециялы, тікбұрышты немесе синусоидалы гофр профильдерін өндіретін зауыттар болмағандықтан, бұл зерттеуде үшбұрышты гофрленген қабырғаға басымдық берілген [14].

Зерттеу әдісі жазық және гофрленген қабырғалы кранасты арқалықтардың жұмысын сандық модельдеу арқылы талдауға негізделген. Мақсат – олардың көтергіш қабілетін, орнықтылығын және оңтайлы параметрлерін бағалау, сондай-ақ құрылыс барысында шығындарды азайту және еңбек өнімділігін арттыру [15].

Үшбұрышты гофрленген қабырғасы бар жай тірелген арқалыққа эксперименттік зерттеу жүргізілді. Гофрленген қабырғасы бар кранасты арқалықтарды есептеуге арналған стандартталған әдістеме болмағандықтан, әсіресе жұқа гофрленген қабырғалар үшін олардың құрылыс саласында қолданылуын негіздеу мақсатында толық өлшемді сынақтар қажет.

Экспериментте қолданылған геометриялық параметрлер, материалдар, жүктемелер және граничтік шарттар төменде көрсетілген [16].

2019 жылы жүргізген теориялық және тәжірибелік зерттеулер нәтижесінде қалыңдығы 2 мм болатын қабырғалар үшін гофрдің тиімді геометриялық параметрлері анықталды [2].

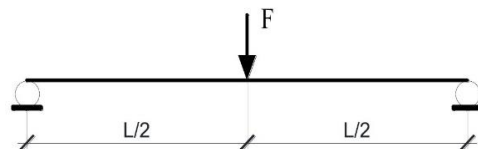
Сынақтар 1:2 масштабтағы үлкейтілген үлгіде жүргізілді: тұрақты көлденең қимасы бар арқалық (сөре 150×6 мм, қабырға 600×2 мм, гофр параметрлері $280 \times 45 \times 2/30$ мм), аралық ұзындығы 4200 мм.

Сынақ барысында түсірілген жүктемелер электронды динамометр арқылы өлшеніп, манометрмен тексерілді. Иілу шамалары 0,01 мм дәлдіктегі электронды индикаторлармен тіркелді, ал үлгінің орнынан жылжуы немесе жергілікті жанышталу әсерлері есепке алынып, алынған нәтижеден алынып тасталды.

Индикаторлар арқалықтың тірек нүктелері мен жүктеме түсірілген орындарында орнатылып, тік бағыттағы орын ауыстыруларды тіркеді. Арқалық үшін жобалық жүктеме $F_r = 60$ кН деп белгіленді. Жүктеме сатылы түрде берілді: алғашқы екі сатыда 10 кН, кейінгі сатыларда 5 кН қосылып отырды. Әр сатыдан кейін үзіліс жасалып, иілу көрсеткіштері тіркелді.

Сынақ жай тірелген арқалықтың көлденең иілуі схемасы бойынша жүргізілді: шоғырланған күш аралықтың ортасында түсіріліп, арқалықтың ұштары тіректерге шарнирлі бекітілді.

Арқалықтың жалпы көрінісі мен геометриялық өлшемдері 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1. Сынақ моделін жүктеу схемасы

Үшбұрышты пішінді және төбелерінде дөңгелектенген гофралар толқын ұзындығы $L_g = 280$ мм және толқын биіктігі $f_g = 45$ мм болатын. Қабырға мен сөрелердің материалы ретінде 3СП болаты таңдалды, ол ГОСТ 380-2005 стандарты бойынша С245 маркасына сәйкес келеді. Оның сипаттамалары: ағымдық шегі $\sigma_y = 245$ Н/мм², беріктік шегі $\sigma_u = 370$ Н/мм². Нақты ағымдық шек $\sigma_y = 418,7$ Н/мм², ал беріктік шек $\sigma_u = 475,6$ Н/мм². Арқалықтар «Юсем Тау» ЖШС цехында, Алматы қаласында дайындалды. Гофрленген арқалықтың жалпы көрінісі 2-суретте берілген.

Арқалықтар ДГО-25 гидравликалық домкраттары арқылы 100×20 мм болат пластинамен, ұзындығы сөренің еніне тең ($L = 150$ мм) жүктелді. Жүктемені тең үлестіру үшін домкраттар арқалықтың ортасына симметриялы орнатылып, шлангтармен жалғанып, бір сорғы арқылы қолмен басқарылады. Жүктеу схемасы 1-суретте көрсетілген.

Арқалықтардың деформациялану қасиеттері олардың кернеулі күйімен қатар зерттелді, себебі жұқа гофрленген қабырғалары бар арқалықтардың деформациясына қатысты ақпарат аз, бірақ олардың құрылыс практикасындағы маңыздылығы жоғары.

Гофрленген қабырғалы кранасты арқалықтарды сандық модельдеуге арналған ЛИРА-САПР 2022 бағдарламалық кешеніндегі шекті элементтер әдісін (ШЭӘ) қолдану оның құрылыс механикасы есептерін шешудегі дәлдігімен, гофралардың күрделі геометриялық пішіндерін нақты ескеру қабілетімен, кернеу-деформация күйінің әртүрлілігін бейнелей алуымен және

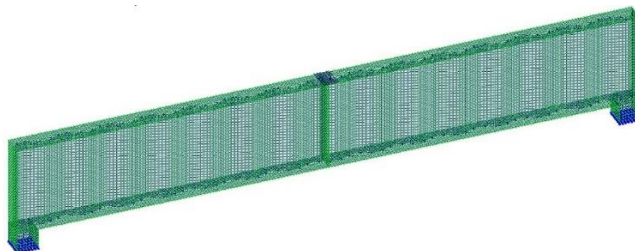
нәтижелерді эксперименттік деректермен салыстыру арқылы тексеру мүмкіндігімен негізделген. Бұл тәсіл арқалық сынақтары арқылы сәтті жүзеге асырылды.

ЛИРА-САПР бағдарламасындағы сандық модельдеу әдісі негізділігіне қарамастан, шекарадағы жағдайларды, әсіресе дәнекер жіктер мен тіректер аймағында нақты беру, гофраның күрделі геометриясын ескере отырып тордың оңтайлы параметрлерін таңдау, сондай-ақ жоғары жүктемелер кезіндегі мүмкін болатын сызықтық емес әсерлер – осының барлығы нәтижелерді мұқият тексеруді және растауды талап етті.

Гофрленген арқалықтарға жүргізілген эксперименттік зерттеулер олардың жұмыс істеу принциптері мен жобалық шешімдерінің тиімділігіне қатысты әртүрлі гипотезаларды дәлелдеу үшін аса маңызды. Қазақстандық және шетелдік құрылыс нормаларында гофра қалыңдығы, ұзындығы, тереңдігі және иілу радиусы бойынша нақты талаптар жоқ.

Жүргізілген сынақтар бірдей пайдалану жағдайларында бірдей қималы арқалықтардың деформациялану қасиеттерін салыстыруға, сондай-ақ ЛИРА-САПР 2022 бағдарламасындағы компьютерлік модельдеудің дұрыстығын тексеруге мүмкіндік береді. Бұл бағдарлама гофрленген двутавр арқалықтарға болашақта сандық зерттеулер жүргізу үшін негізгі құрал ретінде қолдануға лайық.

Соңғы элементтер әдісі негізінде жасалған сандық модель 2019 жыды зерттелген арқалық (2-сурет) бойынша [2] эксперименттік деректермен салыстырылып тексерілді, бұл оның нақтылығы мен сенімділігін растады. Осыдан кейін гофрленген қабырға үшін бақылау өлшемдері таңдалып, тиімді параметрлер есептеліп, анықталды.



Сурет 2. Гофрленген қабырғасы бар кранасты арқалық

2-кестеде Б-1 арқалығы үшін аралықтың ортасындағы иілу моменті (M_e), тіректердегі көлденең күш (Q_e), сөрелердегі максималды кернеу ($\sigma_{\max}$), қабырғалардағы максималды кернеу ($\tau_{\max}$), сондай-ақ эксперименттік (Y_e), теориялық (Y_t) және есептік (Y_c) иілім мәндері берілген.

Сандық экспериментте тор параметрлерінің нәтижеге тәуелділігін жою мақсатында тордың тәуелсіздігі ескерілді. Гофраның иілу доғасының ең кіші ұзындығы 18,66 мм болғандықтан, бастапқы тор өлшемі $0,02 \times 0,02$ м деп алынды.

Компьютерлік модельдеу соңғы элементтер әдісіне негізделген ЛИРА-САПР 2022 бағдарламалық кешені арқылы жүргізілді. Шекаралық шарттар арқалық моделінің екі шетіне, яғни шеткі пластина бетінің түйіндеріне қажетті еркіндік дәрежелерін шектеу арқылы берілді. Арқалықтың екі шеті Y және Z осьтері бойынша бекітілді.

Қабырға мен сөрелердің материалы ретінде ГОСТ 380-2005 стандартына сәйкес келетін С245 маркалы болат таңдалды. Бұл болаттың ағымдық шегі $\sigma_y = 245 \text{ Н/мм}^2$, серпімділік модулі $E = 206000 \text{ МПа}$, ал Пуассон коэффициенті 0,3-ке тең. Сығылу және созылу кезіндегі шекті салыстырмалы деформация 0,025 немесе 2,5% құрайды.

Кесте 1

Эксперименттік деректердің нәтижелері

Ең үлкен жүктеме $F_{\text{э, max}}$, кН	Аралықтың ортасындағы иілу моменті $M_{\text{э}}$, кН·м	Тіректердегі көлденең күш $Q_{\text{э}}$, кН	Иілу (мм)	
			Y_T	$Y_{\text{э}}$
150	157,5	75	8,04	13,28

Кесте 2

Торлық тәуелсіздік

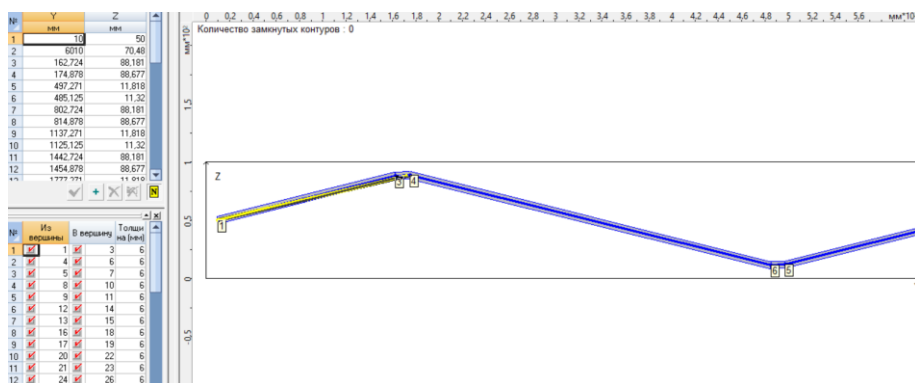
Тор №	i_x , дана	i_y , дана	ε , мм	%
1	211	8	10,1	-
2	421	16	13,6	34,65
3	841	31	12,9	5,11
4	1681	61	12,8	0,78

№3 және №4 торлардың арасындағы айырмашылық 0,89% болғандықтан, есептеулерді $5 \times 5 \text{ мм}$ өлшемді пластиналармен жалғастырамыз.

Жазық қабырғасы бар аркалықтың өлшемдік сипаттамалары 1982 жылы Алматы қаласында ЦНИИПроектстальконструкция институты шығарған қолданбалы кранасты аркалықтар сериясынан алынған.

Одан әрі гофрленген қабырғалары бар кранасты аркалық үлгілері модельденіп, сандық есептеулер жүргізілді, олардың нәтижелері салыстырылып, геометриялық ерекшеліктері ескеріле отырып сипатталды.

Кейін осы 7-суретте бейнеленген координаттар SCAD Тонус есептік кешенінің постпроцессорына енгізіліп, геометриялық сипаттамалар анықталды.



Сурет 3. SCAD Тонус постпроцессорында $640 \times 80 \times 6/30$ өлшемді гофрленген қабырға координаттарын енгізу

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Жалпақ және гофрленген қалыңдығы 6, 8, 10 мм болатын қабырғаларды салыстырмалы талдау үшін негізгі параметрлер 3, 4, 5 кестелерде келтірілген.

Кесте 3

Қалыңдығы 6 мм гофрленген қабырғалардың негізгі көрсеткіштері мен болат шығынының салыстырмалы сипаттамасы

Көрсеткіш атауы	Жалпақ қабырға	гофрленген қабырға								
		420х 70х6/ 30	480х 70х6/ 30	480х 80х6/ 30	520х 80х6/ 30	580х 80х6/ 30	630х 80х6/ 30	640х 70х6/ 30	640х 80х6/ 30	650х 80х6/ 30
Көлденең қиманың ауданы, см ²	360,00	378,00	374,14	378,21	375,75	372,83	371,93	368,08	370,63	370,97
Теңестірілген жалпақ қабырғаның қалыңдығы, мм	-	31,1	31,1	34,0	33,9	34,1	33,9	31,0	34,1	34,0
1 ж.м. қабырғаға болат шығыны, т	0,471	0,495	0,490	0,495	0,492	0,488	0,487	0,482	0,485	0,485

3-кестеде қалыңдығы 6 мм болатын жалпақ және гофрленген қабырғалар үшін негізгі техникалық көрсеткіштер мен болат шығынының салыстырмалы сипаттамасы келтірілген. Көлденең қиманың ауданы бойынша ең үлкен мән – 378,21 см² (480х80х6/30), ал ең төменгі мән – 368,08 см² (640х70х6/30). Теңестірілген жалпақ қабырғаның қалыңдығы 31,0 мм-ден (640х70х6/30) 34,1 мм-ге дейін (580х80х6/30 және 640х80х6/30) өзгеріп отырады. 1 ж.м. қабырғаға болат шығыны ең аз – 0,482 т (640х70х6/30), ал ең көп – 0,495 т (420х70х6/30 және 480х80х6/30). Жоғарыда келтірілген барлық көрсеткіштерді ескере отырып, 640х80х6/30 гофрленген қабырғасы көлденең қиманың жеткілікті ауданы, оңтайлы эквивалентті қалыңдық және салыстырмалы түрде төмен болат шығыны бойынша ең тиімді нұсқа ретінде ұсынылады.

Кесте 4

Қалыңдығы 8 мм гофрленген қабырғалардың негізгі көрсеткіштері мен болат шығынының салыстырмалы сипаттамасы

Көрсеткіш атауы	Жалпақ қабырға	гофрленген қабырға								
		420х 70х6/ 30	480х 70х6/ 0	480х 80х6/ 30	520х 80х6/ 30	580х 80х6/ 30	630х 80х6/ 30	640х 70х6/ 30	640х 80х6/ 30	650х 80х6/ 30
Көлденең қиманың ауданы, см ²	360,00	378,00	374,14	378,21	375,75	372,83	368,08	370,63	378,00	370,97
Теңестірілген жалпақ қабырғаның қалыңдығы, мм	-	31,1	31,1	34,0	33,9	34,1	31,0	34,1	31,1	34,0
1 ж.м. қабырғаға болат шығыны, т	0,471	0,495	0,490	0,495	0,492	0,488	0,482	0,485	0,495	0,485

4-кестеде қалыңдығы 8 мм болатын гофрленген қабырғалардың негізгі техникалық көрсеткіштері мен болат шығынының салыстырмалы сипаттамасы ұсынылған. Көлденең қиманың ауданы бойынша ең үлкен мән – 378,21 см² (480х80х6/30), ал ең кіші мән – 368,08 см² (640х70х6/30). Теңестірілген жалпақ қабырғаның қалыңдығы 31,0 мм-ден (640х70х6/30) 34,1

мм-ге дейін (580x80x6/30 және 640x80x6/30) өзгереді. 1 ж.м. қабырғаға болат шығыны бойынша ең аз мән 0,482 т (640x70x6/30), ал ең жоғарысы – 0,495 т (420x70x6/30, 480x80x6/30, 650x80x6/30) болып тіркелді. Барлық көрсеткіштерді кешенді түрде бағалау нәтижесінде 640x80x6/30 гофрленген қабырғасы көлденең қимасының жеткілікті ауданы, болат шығынының тиімділігі және эквивалентті қалыңдығы бойынша ең оңтайлы нұсқа ретінде анықталды.

Кесте 5

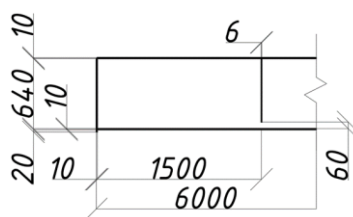
Қалыңдығы 10 мм гофрленген қабырғалардың негізгі көрсеткіштері мен болат шығынының салыстырмалы сипаттамасы

Көрсеткіш атауы	Жалпақ қабырға	гофрленген қабырға									
		420x70x6/30	480x70x6/30	480x80x6/30	520x80x6/30	580x80x6/30	630x80x6/30	640x70x6/30	640x80x6/30	650x80x6/30	
Көлденең қиманың ауданы, см ²	600,00	630,01	623,57	630,35	626,25	621,38	617,72	630,01	623,57	618,28	
Теңестірілген жалпақ қабырғаның қалыңдығы, мм	10,0	37,0	37,0	40,4	40,4	40,5	40,6	37,0	37,0	40,5	
1 ж.м. қабырғаға болат шығыны, т	0,785	0,824	0,816	0,825	0,819	0,813	0,808	0,824	0,816	0,809	

5-кестеде қалыңдығы 10 мм болатын жалпақ және әртүрлі типтегі гофрленген қабырғалар үшін негізгі техникалық көрсеткіштер мен болат шығынының салыстырмалы сипаттамасы берілген. Көлденең қиманың ауданы бойынша ең үлкен мән – 630,35 см² (520x80x6/30), ал ең төменгі мән – 617,72 см² (640x70x6/30). Теңестірілген жалпақ қабырғаның қалыңдығы 37,0 мм-ден (420x70x6/30, 480x70x6/30, 640x80x6/30) 40,6 мм-ге дейін (640x70x6/30) өзгереді. 1 ж.м. қабырғаға болат шығыны бойынша ең аз мән – 0,808 т (640x70x6/30), ал ең жоғарысы – 0,825 т (520x80x6/30). Барлық көрсеткіштерді салыстыра отырып, көлденең қиманың жеткілікті ауданына, төмен эквивалентті қалыңдыққа және орташа болат шығынына ие 640x80x6/30 гофрленген қабырғасы ең тиімді нұсқа ретінде ұсынылады.

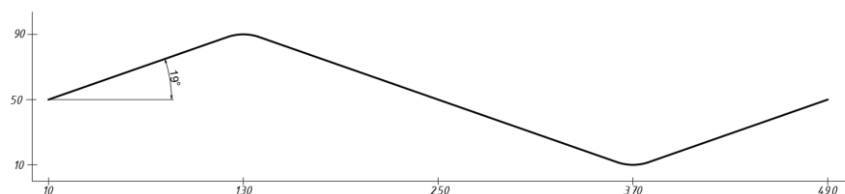
Алдыңғы зерттеулердің нәтижелері гофрленген қабырғаларды қолдану кранасты арқалықтардың беріктігі мен орнықтылығына айтарлықтай оң әсер ететінін көрсетті. Қабырғаның қалыңдығын азайту есебінен болатты үнемдеу 20%-ға дейін жетеді. 2019 жылы жүргізген теориялық және эксперименттік зерттеулер нәтижесінде Халықаралық білім беру корпорациясының зертханасы базасында 6, 8 және 10 мм қалыңдықтағы қабырғалар үшін гофрдің тиімді геометриялық параметрлері анықталды. 2019 жылғы зерттеудегі мәліметтеріне сәйкес [2], бұл параметр – 480x80 мм. Алайда, біздің зерттеуімізде алынған нәтижелер жүктеменің және кранасты арқалықтың жұмыс ерекшеліктеріне байланысты өзгеше болды.

Зерттеу барысында бір жалпақ қабырға және әртүрлі контурлық өлшемдері бар бес үшбұрышты гофрленген қабырға қарастырылды. Салыстыру жүргізу үшін эталон ретінде жалпақ қабырғасы бар арқалық таңдалып алынды. Бұл арқалықтың схемасы 4-суретте көрсетілген. Жалпақ қабырғалы арқалықтың өлшемдік сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.



Сурет 4. Жалпақ қабырғасы бар кранасты арқалықтың өлшемдері

Сонымен қатар, 6-суретте көрсетілген гофрленген қабырғаның шеткі нүктелерінің координаталары анықталды.

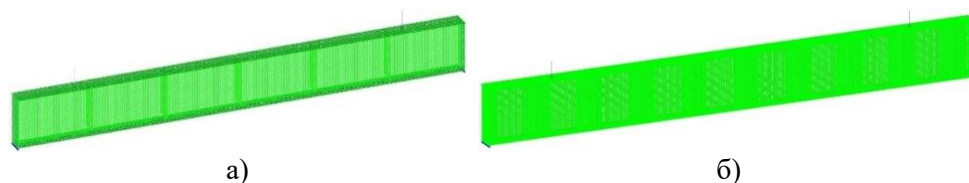


Сурет 5. Жалпақ қабырғасы бар кранасты арқалықтың өлшемдері

Зерттеу үшін 3 түрлі жүктеме мен 3 түрлі кранасты арқалық өлшемдері таңдалып, олардың деформациясы мен кернеулері талданды. Әр конструкцияға көпір қранының доңғалақтарынан түсетін статикалық жүктемелер берілді. Эксперименттік зерттеу үшбұрышты пішінді гофралары бар екі тіректі арқалықта жүргізілді.

Кранасты арқалық көпірлі қранның салмағынан туындайтын жүктемені қабылдайды. Зерттеу үшін жүккөтергіштігі 12,5 т, 32 т және 50/12,5 т болатын қрандар таңдап алынды. Есептеулер кезінде кранасты құрылымдардың салмағы, қран дөңгелегіне түсетін ең үлкен күш, сондай-ақ күш ординаталарының қосындысы ескерілді.

Төменде 6-суретте көпірлі қран дөңгелегінен 9,5 т шамасындағы эксцентриситетсіз шоғырланған жүктеменің түсірілу сызбасы көрсетілген. Есептеу Лира-САПР 2022 бағдарламалық кешенінде жүргізілді.



а) жалпақ қабырғасы бар кранасты арқалық ПБ-1; б) гофрленген қабырғасы бар кранасты арқалық ПБ-2

Сурет 6. ЛИРА-САПР бағдарламалық кешенінде жасалған арқалық модельдері

Қран бір арқалықтың шегінде орналасқанда, ені 4,4 м, 5,1 м және 5,6 м болатын қран базалары үшін екі дөңгелектен түсетін жүктемелерді үлгілейміз.

Рельстерді ұзақ уақыт бойы мерзімді тексерусіз пайдалану салдарынан кей жағдайларда рельстердің ығысуы орын алады, соның нәтижесінде краннан түсетін жүктеме арқалыққа эксцентриситетпен беріледі. Есептеуде эксцентриситет мәні 20 мм деп қабылданады.

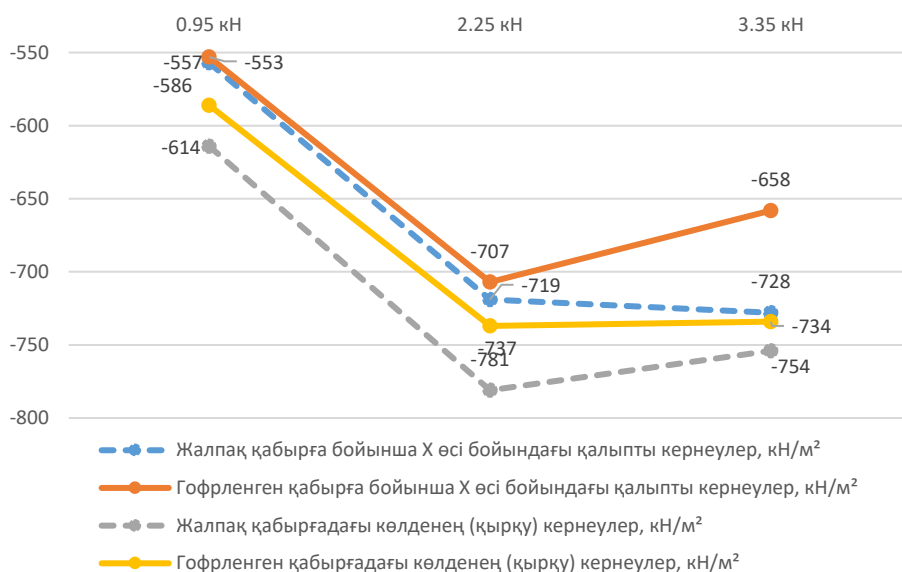
7-суретте кран арқалығының қабырғаларындағы кернеулердің әртүрлі жүктеме шамаларында (0,95 кН, 2,25 кН және 3,35 кН) қалай өзгеретіні көрсетілген. Графикте жалпақ және гофрленген қабырғалар үшін қалыпты (Х өсі бойымен) және қырку (көлденең) кернеулердің таралуы салыстырмалы түрде берілген.

Жалпақ қабырғадағы қалыпты кернеулер (көк сызық) және гофрленген қабырғадағы қалыпты кернеулер (қызғылт сары сызық) шамалары бір-біріне жақын, бірақ жүктеме артқанда гофрленген қабырғада кернеудің өсуі байқалады.

Қырку кернеулері бойынша ең үлкен теріс мәндер жалпақ қабырғаларда байқалады (сұр сызық), бұл олардың қыркуға көбірек ұшырайтынын көрсетеді.

Ал гофрленген қабырғалардағы қырку кернеулері (сары сызық) салыстырмалы түрде аз және тұрақты, бұл гофрдің геометриялық пішіні арқасында қырку кернеулерін тиімді тарату мүмкіндігін көрсетеді.

Осы график негізінде гофрленген қабырға құрылымының жүктемеге төзімділігі жоғарырақ екені және оның қырку кернеулерін азайтатындығы анық байқалады.



Сурет 7. Кран арқалығы қабырғаларындағы кернеулердің таралуы дөңгелектерден түсетін жүктемелер шамасына байланысты әртүрлі жағдайларда

8-суретте жалпақ және гофрленген қабырғасы бар кранасты арқалықтардағы көлденең күштің таралуы жүктеме шамасына байланысты (0,95 кН, 2,25 кН және 3,35 кН) көрсетілген.

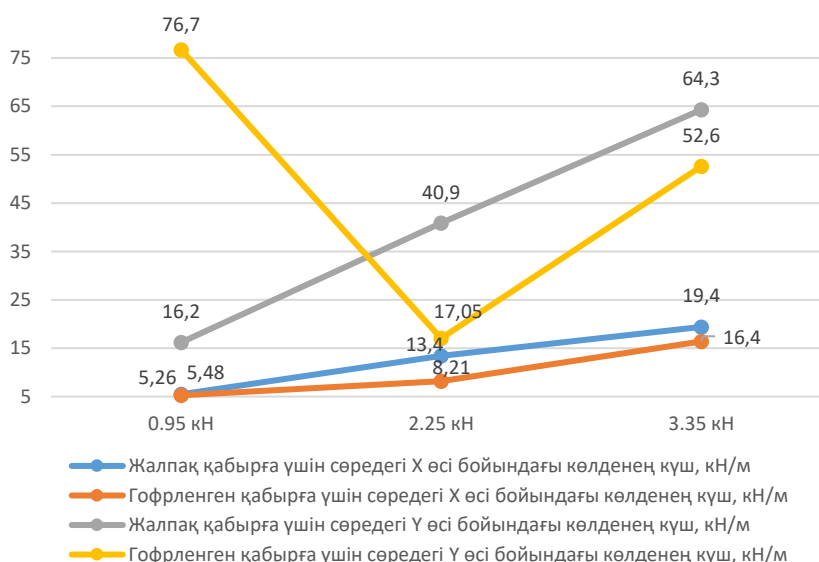
Графиктен келесі үрдістерді байқауға болады:

– Жалпақ қабырға үшін фланецтегі Y өсі бойындағы көлденең күш (сұр сызық) жүктеме артқан сайын айтарлықтай өсіп, 16,2 кН/м-ден 64,3 кН/м-ге дейін жетеді.

– Гофрленген қабырға үшін фланецтегі Y өсі бойындағы көлденең күш (сары сызық) бастапқыда өте жоғары (76,7 кН/м), бірақ 2,25 кН жүктемеде күрт төмендеп (17,05 кН/м), кейін қайтадан 52,6 кН/м-ге дейін көтеріледі.

– X өсі бойындағы көлденең күштер екі қабырға түрінде де төмен, салыстырмалы түрде бірқалыпты өседі: жалпақ қабырға үшін 5,26-тен 19,4 кН/м-ге дейін, ал гофрленген қабырға үшін 5,48-ден 16,4 кН/м-ге дейін.

Бұл мәліметтер гофрленген қабырға құрылымының көлденең күштерді қабылдау кезінде кейбір жағдайларда айтарлықтай артық жүктемеге ұшырауы мүмкін екенін көрсетеді. Сонымен қатар, X өсі бойындағы күштер екі нұсқада да төмен, бұл ось бойымен қырқуға әсер шамалы екенін аңғартады.



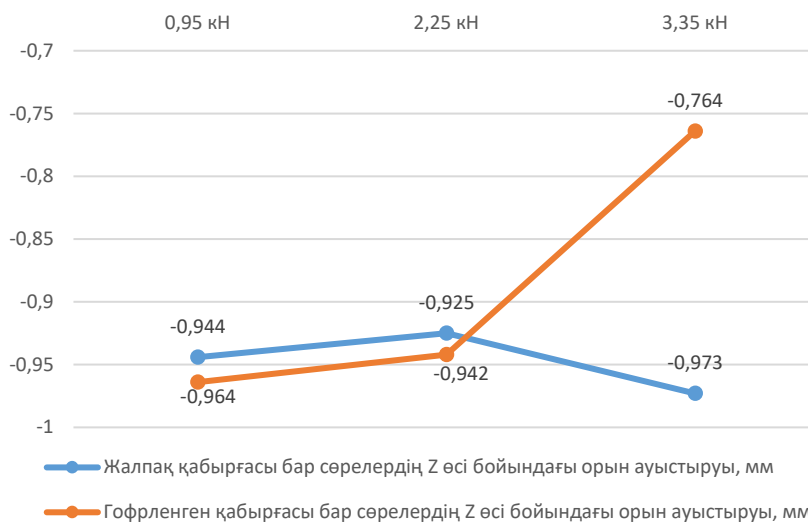
Сурет 8. Жалпақ және гофрленген қабырғасы бар Кранасты арқалықтардағы көлденең күштің таралуы

9-сурет жүктеме шамасына байланысты (0,95 кН, 2,25 кН және 3,35 кН) жалпақ және гофрленген қабырғасы бар кранасты арқалықтардың сөрелерінің Z өсі бойындағы орын ауыстыруларының өзгеруін көрсетеді.

Жалпақ қабырға үшін орын ауыстырулар теріс мәнде сақталып, салыстырмалы түрде бірқалыпты өзгереді: бастапқыда – 0,944 мм, ең үлкен жүктемеде – 0,973 мм-ге дейін ұлғаяды.

Гофрленген қабырға үшін бастапқыда орын ауыстыру – 0,964 мм болса, жүктеменің ұлғаюымен бұл көрсеткіш күрт азайып, – 0,764 мм-ге дейін жақсарады.

Бұл нәтижелер гофрленген қабырғалар конструкциясының Z өсі бойымен деформацияға төзімдірек екенін және жүктемені тиімдірек қайта тарата алатынын дәлелдейді.



Сурет 9. Жалпақ және гофрленген қабырғасы бар кранасты арқалықтардағы көлденең күштің таралуы

Қорытынды. Бұл зерттеуде кранасты арқалықтардың жұмысын жақсарту мақсатында гофрленген қабырға қолданудың тиімділігі жан-жақты зерттелді. Қабырға және сөрелер үшін С245 маркалы болат таңдалып, сандық модельдеу және эксперименттік деректер негізінде геометриялық параметрлердің әсері талданды. Қалыңдығы 6, 8 және 10 мм болатын жалпақ және гофрленген қабырғаларға қатысты салыстырмалы сипаттамалар Кесте 3–5-те ұсынылды. Барлық жағдайда $640 \times 80 \times 6/30$ өлшемді гофрленген қабырға көлденең қиманың ауданы, болат шығыны және эквивалентті қалыңдық тұрғысынан ең тиімді нұсқа ретінде анықталды.

Мақала нәтижелерін талдау арқылы мынадай қорытынды жасауға болады:

- Жалпақ және гофрленген қабырғалар үшін Х өсі бойындағы қалыпты кернеулер ұқсас мәндерге ие болғанымен, гофрленген қабырғаларда жүктеме артқанда кернеулердің өсуі байқалады.
- Қырку кернеулері (Y өсі бойымен) гофрленген қабырғада төменірек және бірқалыпты, бұл оның геометриялық құрылымының кернеуді тиімді тарата алатындығын көрсетеді.
- Жалпақ қабырғадағы қырку кернеулері анағұрлым жоғары болып, конструкцияның әлсіз жері екенін айғақтайды.
- Y өсі бойынша жалпақ қабырғадағы көлденең күштер жүктеме ұлғайған сайын үнемі өсіп отырады (16,2-ден 64,3 кН/м-ге дейін), ал гофрленген қабырғаларда күрт өзгеру байқалады – бастапқыда өте жоғары күштер кейін едәуір төмендеп, соңында қайта өседі.
- Бұл гофрленген қабырғаның кейбір режимдерде күшті қарқынды сіңіру қабілетін және жүктемеге байланысты бейімделу қасиетін көрсетеді.
- Жалпақ қабырғасы бар үлгілерде орын ауыстыру тұрақты түрде өсіп, максималды мән – 0,973 мм-ге жетті.
- Ал гофрленген қабырғада бұл мән – 0,764 мм-ге дейін төмендеді, яғни жүктеме артқан сайын деформация едәуір азайды. Бұл жағдай гофрленген қабырғаның геометриялық қаттылығы арқасында орын алады.

Гофрленген қабырғаларды қолдану арқалықтың құрылымдық сипаттамаларын айтарлықтай жақсартады. Олар қалыпты және қырку кернеулерін біркелкі таратып, болат шығынын төмендетеді және фланецтердің деформациясын азайтады. Бұл қасиеттер кранасты арқалықтардың сенімділігін арттырып, ұзақ мерзімділігін қамтамасыз етеді.

Ең тиімді геометриялық шешім ретінде 640×80×6/30 параметріндегі гофрленген қабырға ұсынылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Wei G. et al. Mechanical Performance of Crane's Main Girders with Corrugated Webs //Proceedings of China Modern Logistics Engineering: Inheritance, Wisdom, Innovation and Cooperation. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. – P. 243-253.
2. Bryantsev A., Absimetov V. Laboratory tests of welded corrugated beams with perforations //Proceedings of EECE 2019: Energy, Environmental and Construction Engineering 1. – Springer International Publishing, 2020. – P. 55-66.
3. Bryantsev A., Okanov D. Replacement of the flat web of the crane runway beam with a corrugated web //Bull. Kazakh Lead. Acad. Archit. Constr. – 2024. – Vol. 91. – P. 133-150.
4. Bryantsev A.A. et al. The influence of various methods of reinforcing circular perforations on the deformability of a welded plate girder with a corrugated web //Mechanics Based Design of Structures and Machines. – 2024. – Vol. 52. – No. 5. – P. 2440-2450.
5. Li J., Yu J., Li Y. Crash test and numerical simulation of composite corrugated web beam //Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics/Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao. – 2023. – Vol. 55. – No. 1.
6. Al-Mawashee H. S., Al-Kannoon M. A. A. Flexural strength of castellated beams with corrugated webs //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1973. – No. 1. – P. 012213.
7. Hlal F., Al-Emrani M. Flange buckling in stainless-steel corrugated webs I-girders under pure bending: Numerical study //Journal of Constructional Steel Research. – 2023. – Vol. 208. – P. 108031.
8. Kettler M., Unterweger H., Ebner D. Local stresses in crane runway girders with longitudinal stiffeners-experimental and numerical analyses //STAHLBAU. – 2021. – Vol. 90. – No. 4. – P. 248-261.
9. Sebastiao L., Papangelis J. Elastic local shear buckling of beams with sinusoidal corrugated webs //Structures. – Elsevier, 2023. – Vol. 54. – P. 684-692.
10. Ibrahim S. A., El-Dakhakhni W. W., Elgaaly M. Behavior of bridge girders with corrugated webs under monotonic and cyclic loading //Engineering Structures. – 2006. – Vol. 28. – No. 14. – P. 1941-1955.
11. Kettler M., Jurschitsch T., Unterweger H. Impact of rail joints on the local stresses in crane runway girders //Structures. – Elsevier, 2023. – Vol. 52. – P. 1087-1100.
12. Yuan H. et al. Shear behaviour and design of bolted steel girders with trapezoidal corrugated webs //Journal of Constructional Steel Research. – 2024. – Vol. 216. – P. 108573.
13. Genshu T., Zejun X. Revisiting the bearing stresses in webs of crane runway girders under wheel loads //Advances in Structural Engineering. – 2018. – Vol. 21. – No. 12. – P. 1792-1801.
14. Ren T., Tong G. Bearing stress of crane runway girders under wheel loads //JOURNAL-ZHEJIANG UNIVERSITY ENGINEERING SCIENCE. – 2005. – Vol. 39. – No. 10. – P. 1582.
15. Bijak R., Kolodziej G., Siedlecka M. Lateral-torsional buckling resistance of crane runway girders //IOP conference series: materials science and engineering. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 471. – No. 5. – P. 052076.

16. Zhao X., Yue Q., Xing K. Research on Fatigue Properties of Plug-Plate End of Crane Runway Girders Variable Section Abutment with Right Angle End-Plate // Journal of Building Structures. – 2020. – Vol. 41. – No. 8.

Материал редакцияға 05.04.25 түсті, 22.06.25 қабылданды.

Д.А. Оканов¹, А.А. Брянцев¹, С.Е. Ниетбай¹, Ж.Н. Молдамуратов¹

¹*Международная образовательная корпорация, г. Алматы, Казахстан*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

Аннотация. Данная статья посвящена исследованию возможности замены плоской стенки в подкрановых балках на гофрированную с целью повышения надежности и устойчивости сварных соединений. В ходе исследования проведен анализ напряжений в структуре двух типов очертаний стенок, выявлены особенности и преимущества гофрированных стенок. Статья предоставляет детальный обзор результатов анализа, демонстрируя, как гофрированная структура может эффективно заменить плоскую, увеличив прочностные, жесткостные свойства и характеристики по несущей способности и устойчивости, параллельно предотвращая отрыв сварных швов под воздействием нагрузок. Подробно рассматриваются причины выбора данного метода и его практическая применимость в промышленных условиях. В исследовании был проведен компьютерный эксперимент, включающий в себя расчеты с использованием постпроцессора Тонус ПК SCAD, а также ПК Лири-САПР 2022. Этапы проведения эксперимента включают в себя построение конечно-элементной модели балки, основанной на физическом эксперименте, расчеты геометрических характеристик различных очертаний стенки в постпроцессоре Тонус, моделирование трехмерных подкрановых балок с плоскими и гофрированными стенками, расчет и определение максимальных нормальных и касательных напряжений в стенке в ПК Лири-САПР 2022, сравнение результатов балок с плоскими и гофрированными стенками и интерпретацию результатов, и обоснование выводов на основе полученных данных. Авторы выделяют перспективы применения данного подхода в различных областях промышленности, подчеркивая его важность для обеспечения безопасности и долговечности конструкций подкрановых балок. Полученные результаты являются основой для дальнейших исследований и практического внедрения инновационных решений в проектирование и эксплуатацию промышленных сооружений.

Ключевые слова: подкрановая балка, плоская стенка, гофрированная стенка, статическая нагрузка, мостовой кран, поперечная сила, нормальные напряжения.

D.A. Okanov¹, A.A. Bryantsev¹, S.E. Niyetbay¹, Zh.N. Moldamuratov¹

¹*International educational corporation, Almaty, Kazakhstan*

MODELING AND STRESS ANALYSIS OF CRANE GIRDERS WITH CORRUGATED WEBS

Abstract. This article is devoted to the study of the possibility of replacing the flat web in crane girders with a corrugated one to increase the reliability and stability of welded joints. During the research, stress analysis was carried out on structures with two types of web contours, revealing the features and advantages of corrugated webs. The article provides a detailed overview of the analysis results, demonstrating how a corrugated structure can effectively replace a flat one by improving strength, stiffness,

load-bearing capacity, and stability, while simultaneously preventing weld detachment under load. The reasons for choosing this method and its practical applicability in industrial conditions are thoroughly examined. The study included a computer-based experiment involving calculations using the Tonus post-processor of the SCAD software package, as well as the LIRA-SAPR 2022 software. The stages of the experiment included the creation of a finite element model of the beam based on a physical experiment, calculations of geometric characteristics of various web shapes using the Tonus post-processor, 3D modeling of crane girders with flat and corrugated webs, computation and determination of maximum normal and shear stresses in the web using LIRA-SAPR 2022, comparison of results for beams with flat and corrugated webs, interpretation of the results, and justification of conclusions based on the obtained data. The authors highlight the potential applications of this approach in various industrial sectors, emphasizing its importance for ensuring the safety and durability of crane girder structures. The results obtained serve as a foundation for further research and the practical implementation of innovative solutions in the design and operation of industrial structures.

Keywords: crane girder, flat web, corrugated web, static load, overhead crane, transverse force, normal stresses.