

УДК 621. 86

А.В. Лагереv, П.В. Бословяк

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЗЛОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ NX

Представлен подробный алгоритм оптимального проектирования конвейера с подвесной лентой. Выполнено оптимальное проектирование узлов металлоконструкции и проведен их анализ на примере эксплуатируемого конвейера с подвесной лентой.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, металлоконструкция, алгоритм, процесс, узел, конвейер с подвесной лентой, программный комплекс.

Универсальная методика оптимального проектирования металлоконструкций (МК) конвейеров с подвесной лентой [1; 2] позволяет конструктору на начальном этапе проектирования создать наиболее выгодный с экономической точки зрения вариант металлоконструкции.

Оптимальное проектирование узлов металлоконструкции конвейера выполнялось для спроектированной и изготовленной металлоконструкции ООО «Конвейер» (г. Брянск). Данная конструкция состоит преимущественно из швеллеров № 6,5 по ГОСТ 8240–89, используемых в линейной секции и частично в приводной станции, а также из прямоугольных труб 80×40×4 по ГОСТ 8645–68 в металлоконструкциях натяжной и приводной станций, соединенных между собой в основном при помощи сварки. В качестве прямолинейных направляющих качения используются трубы 57×4 по ГОСТ 8732–78, а для криволинейных направляющих применяется круглый прокат 56 по ГОСТ 2590–88. Детали узлов выполнены из стали 09Г2С. Основные характеристики данного конвейера: производительность – 120 т/ч; скорость – 1 м/с; длина – 97 м; ширина ленты – 800 мм.

В качестве программного комплекса, в котором выполняется оптимальное проектирование металлоконструкции, используется продукт системы CAD/CAM/CAE NX [3], предназначенный для автоматизированного проектирования, изготовления и расчетов конструкций. Данный комплекс относится к системам высокого уровня и обладает широким набором инструментальных средств.

Общий алгоритм оптимального проектирования (рис. 1) осуществляется во взаимосвязанных средах NX NASTRAN и Altair HyperOpt программного комплекса NX.

Первоначально проектирование осуществляется в среде NX NASTRAN. Здесь выполняется формирование исходных данных – геометрической каркасной модели, а также дальнейшее ее преобразование в конечноэлементную (КЭ) расчетную схему (разбивка на коллекторы). Следует отметить, что данная процедура осуществляется после составления целевых функций и систем ограничений [1] для заданной металлоконструкции конвейера с подвесной лентой.

Геометрическая каркасная модель представляет собой сборку, включающую четыре узла конструкции в качестве компонентов: приводную станцию, натяжную станцию, линейную секцию, направляющие кареток. Построение данной модели осуществляется в CAD-подсистеме NX.

В конечноэлементной расчетной схеме стержни конструкции разделены по группам, в разной степени участвующим в процессе оптимизации. Каждый стержень группы в дальнейшем разбивается на заданное число элементов для расчета металлоконструкции методом конечных элементов. Следующим действием является выбор материала для группы элементов. Далее выбирается тип профиля поперечного сечения для каждого коллектора. Для этого предварительно формируется база данных справочных материалов, в качестве основных элементов которой выбираются четыре типа поперечного сечения:

уголок, швеллер, прямоугольная и круглая трубы. Указанная операция взаимосвязана с последующей – выбором размеров профилей поперечного сечения. Для каждой группы задаются индивидуальные параметры стержневых элементов, которыми осуществляется конечноэлементное моделирование металлоконструкции. Сетка конечных элементов формируется в модуле Advanced Simulation программного комплекса NX, предназначенном для выполнения инженерного анализа.

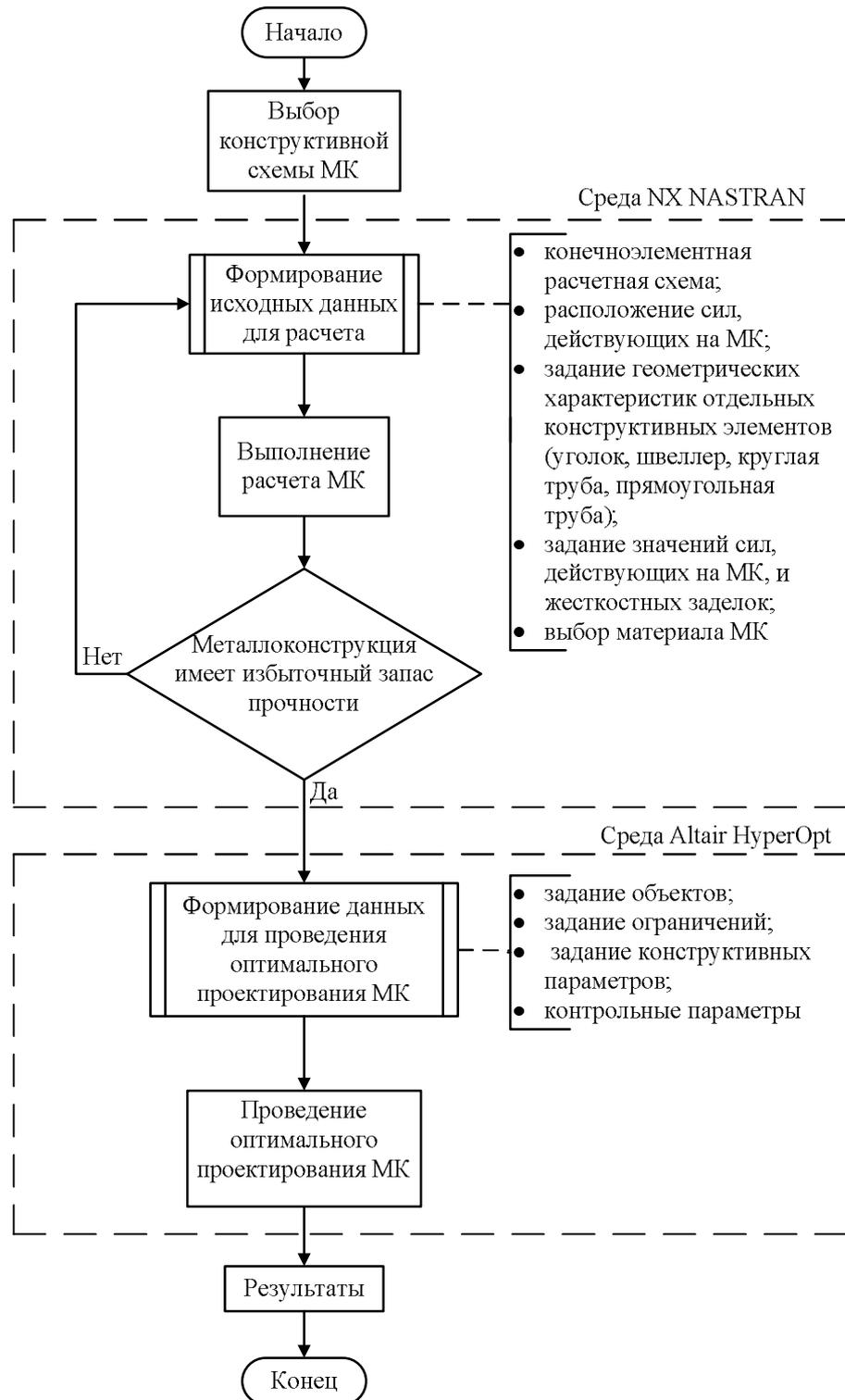


Рис. 1. Общий алгоритм оптимального проектирования МК в программном комплексе NX

Следующий этап алгоритма – выбор мест закрепления металлоконструкции (задание ограничения в виде заделки) и ввод нагрузок, действующих на конструкцию (представлены эквивалентными силами), результат которого показан на рис. 2.

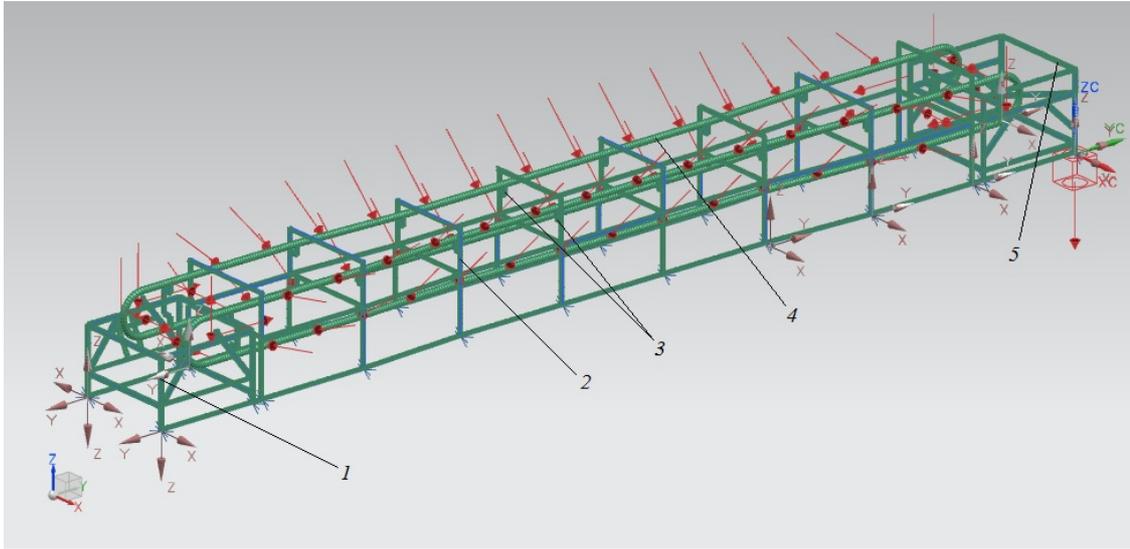


Рис. 2. Расчетная схема несущей конструкции КПЛ при проведении оптимального проектирования:
 1 – приводная станция; 2 – линейная секция; 3 – крепления направляющих к стойкам;
 4 – направляющая качения; 5 – натяжная станция

После выполнения всех указанных этапов алгоритма приступаем к оптимальному проектированию металлоконструкции конвейера. Необходимо уточнить, что будет рассмотрено несколько альтернативных вариантов проектирования металлоконструкции ООО «Конвейер». В первом из них осуществляется оптимизация размеров прямоугольной трубы и швеллера, т.е. тип профиля поперечного сечения остается неизменным. В результате проектирования определены сечения стержней и раскосов, удовлетворяющие моментам сопротивления, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Предварительные результаты оптимального проектирования деталей МК

Узел металлоконструкции конвейера	Сечение детали	Момент сопротивления, см ³	
		W_y	W_z
Натяжная и приводная станции	Прямоугольная труба	0,67	0,91
Крепления направляющих к стойкам	Прямоугольная труба	0,32	0,47
Линейная секция и часть МК приводной станции	Швеллер	0,41	0,66

На основании данных табл. 1 определяем оптимальные размеры узлов металлоконструкции ООО «Конвейер»:

- натяжная и приводная станции – прямоугольная труба 30×15×2;
- крепления направляющих к стойкам – прямоугольная труба 30×10×2;
- линейная секция и часть МК приводной станции – швеллер №5.

После получения оптимальных размеров профилей стержней металлоконструкции выполняется ее расчет от действия следующих сил и моментов: осевой силы N_x ; срезающей силы Q_y ; срезающей силы Q_z ; момента M_x ; момента M_y ; момента M_z .

Полученные значения сравниваются с допускаемыми в соответствии с системами ограничений [1; 4]:

- при расчете сжатых составных стержней на условную поперечную силу Q_{fic} , принимаемую постоянной по всей длине стержня,

$$Q_{fic} = 7,15 \cdot 10^{-6} (2330 - E / R_y) N / \varphi; \quad (1)$$

- при расчете на прочность элементов, подверженных осевой силе с изгибом,

$$\frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{M_z}{W_z} \leq R_y \gamma_c, \quad (2)$$

где E – модуль упругости; R_y – расчетное сопротивление материала растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести; N – продольная сила; φ – коэффициент продольного изгиба; A – площадь сечения; M_y, M_z – изгибающие моменты относительно осей $y - y$ и $z - z$ соответственно; W_y, W_z – моменты сопротивления сечения относительно осей $y - y$ и $z - z$ соответственно; γ_c – коэффициент условий работы.

Анализ расчета металлоконструкции от действия сил и моментов показал, что она удовлетворяет системам ограничений (1), (2). Максимальные напряжения, возникающие в металлоконструкции, равны 285 МПа, в то время как предельные – 312 МПа. В табл. 2 представлен вариант 1 сравнения масс узлов металлоконструкции.

Таблица 2

Результат оптимального проектирования МК с профилем прямоугольной трубы для натяжной и приводной станций, для линейной секции – швеллера (вариант 1)

Узел конвейера	Масса металлоконструкции, кг		
	до оптимального проектирования	после оптимального проектирования	
ООО «Конвейер»	9374	8022	
Линейная секция	185	142	
Натяжная станция	255	60	
Приводная станция	214	76	
Направляющая	прямолинейная	3979	3979
	криволинейная	365	365

Из табл. 2 видно, что масса металлоконструкции ООО «Конвейер» после процедуры оптимального проектирования снизилась на 1352 кг (14%). При этом сечения швеллера и прямоугольной трубы были взяты меньших размеров, а не заменены другими. Также для данного варианта металлоконструкции не проводилось оптимальное проектирование направляющих. В связи с этим для последующих вариантов оптимального проектирования появляется возможность уменьшить массу металлоконструкции заменой поперечных сечений на альтернативные других профилей, а также оптимизацией направляющих.

Стоит отметить, что конвейер, возможно, будут эксплуатировать в агрессивной внешней среде. Поэтому необходимо обеспечить нормальную способность его работы с учетом коррозионного воздействия на металлоконструкцию. Для этого оптимальная металлоконструкция была получена с запасом на коррозионное воздействие.

В результате расчетов выявлено, что металлоконструкция ООО «Конвейер» эксплуатируется в исправном состоянии при уменьшении толщины стенки у всех ее деталей на 0,2 мм. При этом максимальные напряжения, возникающие в ней, увеличиваются на 20 МПа и составляют 305 МПа, а масса конвейера снижается на 323 кг (4 %) и становится равна 7699 кг.

Выявлено, что в сечениях металлоконструкции линейной секции возникают одни из самых минимальных напряжений (до 20 МПа). В связи с этим проводим оптимальное проектирование МК конвейера с учетом замены принятого ООО «Конвейер» профиля се-

чения линейной секции в виде швеллера на соответствующий ему по характеристикам профиль прямоугольной трубы.

В качестве оптимального профиля линейной секции определена прямоугольная труба $25 \times 15 \times 2$ со следующими характеристиками: $W_y = 0,58 \text{ см}^3$; $W_z = 0,803 \text{ см}^3$; масса 1 м равна 1,08 кг. Максимальные напряжения, возникающие в конструкции при использовании данного профиля сечения линейной секции, равны 263 МПа. Результат сравнения варианта 2 с металлоконструкцией до оптимизации представлен в табл. 3.

Таблица 3

Результат оптимального проектирования МК с профилем прямоугольной трубы для натяжной, приводной станций и линейной секции (вариант 2)

Узел конвейера	Масса металлоконструкции, кг		
	до оптимального проектирования	после оптимального проектирования	
ООО «Конвейер»	9374	5445	
Линейная секция	185	35	
Натяжная станция	255	47	
Приводная станция	214	40	
Направляющая	прямолинейная	3979	3979
	криволинейная	365	365

При сравнении вариантов металлоконструкции до оптимального проектирования и после видно, что оптимальный вариант МК весит на 3929 кг (42 %) меньше существующей металлоконструкции ООО «Конвейер». Также видно, что при замене профиля поперечного сечения в виде швеллера № 5 на прямоугольную трубу $25 \times 15 \times 2$ масса металлоконструкции снизилась на 2577 кг (32 %). Из полученных результатов следует, что при использовании трубчатых профилей металлоёмкость конструкции существенно снижается.

Из расчетов следует, что металлоконструкция ООО «Конвейер» будет работоспособна при снижении толщины стенки у всех деталей металлоконструкции на 0,4 мм. Максимальные напряжения при этом возрастут на 42 МПа и будут равны 305 МПа, а масса конвейера снизится на 615 кг (11 %) и составит 4830 кг.

Для вариантов 1 и 2 МК ООО «Конвейер» не проводилось оптимальное проектирование направляющих качения, так как для всех типов конвейеров данного предприятия изготавливаются одинаковые подвески, которые перемещаются по направляющим. Следовательно, при изменении размеров направляющих в результате оптимизации необходимо проектировать новые подвески, что достаточно трудоемко. Так как масса металлоконструкции направляющих в некоторых вариантах составляет 40–80% от массы всей металлоконструкции, то возникает необходимость провести оптимальное проектирование МК конвейера с учетом оптимизации всех его составляющих.

При проведении оптимального проектирования направляющих металлоконструкции ООО «Конвейер» задаем следующие ограничения:

- направляющие на прямолинейном участке конвейера выполняются из круглой трубы, а на криволинейном – из круглого проката;
- диаметры направляющих на двух участках имеют равные значения (исключение составляет несовпадение размеров в сортаменте профилей).

В качестве оптимальных профилей определены круглая труба 42×3 с $W_y = W_z = 3,347 \text{ см}^3$ и массой 1 м, равной 2,89 кг, и круглый прокат диаметром 42 мм с $W_y = W_z = 7,27 \text{ см}^3$ и массой 1 м, равной 10,87 кг. Максимальные напряжения возникают в конструкции приводной станции и равны 282 МПа. Результат оптимального проектирования варианта 3 МК конвейера представлен в табл. 4.

Таблица 4

Результат оптимального проектирования МК с профилем прямоугольной трубы для натяжной и приводной станций, для линейной секции – швеллера (вариант 3)

Узел конвейера	Масса металлоконструкции, кг		
	до оптимального проектирования	после оптимального проектирования	
ООО «Конвейер»	9374	5912	
Линейная секция	185	142	
Натяжная станция	255	60	
Приводная станция	214	76	
Направляющая	прямолинейная	3979	2304
	криволинейная	365	205

В результате анализа и сравнения полученного результата с вариантом до оптимизации установлено, что полученная металлоконструкция весит на 3462 кг (37 %) меньше, чем вариант до оптимизации. Очевидно также и снижение массы направляющих, которое составило 1835 кг, или 42 %.

Стоит отметить, что при коррозионном воздействии металлоконструкция ООО «Конвейер» работоспособна при уменьшении толщины стенки у всех деталей на 0,2 мм. Максимальные напряжения при этом возрастают на 20 МПа и составляют 302 МПа, а масса конвейера снижается на 188 кг (3 %) и становится равна 5724 кг.

Рассмотрим и проанализируем вариант металлоконструкции, когда в процессе оптимизации участвуют направляющие, при этом приводная, натяжная станции и линейная секция выполнены из прямоугольной трубы. Максимальные напряжения в такой конструкции равны 258 МПа. Результат оптимального проектирования варианта 4 МК конвейера (с учетом направляющих) представлен в табл. 5.

Сравнение металлоконструкций варианта 4 и ООО «Конвейер» показало, что масса МК, полученная после оптимального проектирования, снизилась на 5973 кг (63,7 %). Массы направляющих уменьшились на 1835 кг, как и для варианта 3.

При влиянии коррозии на стенки стержней и раскосов металлоконструкция ООО «Конвейер» будет исправно эксплуатироваться при уменьшении толщины стенки у всех деталей на 0,4 мм. При этом максимальные напряжения возрастут на 40 МПа и будут равны 298 МПа, а масса металлоконструкции варианта 4 снизится на 475 кг (14 %) и составит 2926 кг.

Таблица 5

Результат оптимального проектирования МК с профилем прямоугольной трубы для натяжной и приводной станций, линейной секции (вариант 4)

Узел конвейера	Масса металлоконструкции, кг		
	до оптимального проектирования	после оптимального проектирования	
ООО «Конвейер»	9374	3401	
Линейная секция	185	35	
Натяжная станция	255	47	
Приводная станция	214	40	
Направляющая	прямолинейная	3979	2304
	криволинейная	365	205

Таким образом, рассмотрено оптимальное проектирование металлоконструкции ООО «Конвейер» с различными вариантами исполнения профилей поперечного сечения. Диаграмма зависимости массы металлоконструкции от варианта оптимального проектирования представлена на рис. 3. Стоит отметить, что металлоконструкция ООО «Конвейер» имеет избыточную прочность, поэтому не была определена ее масса с учетом коррозии.

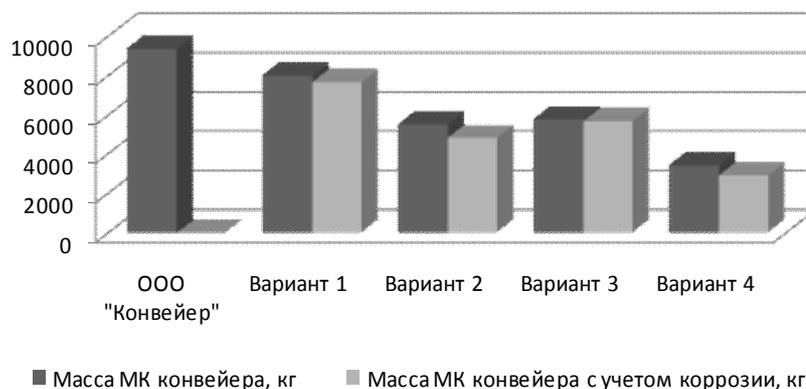


Рис. 3. Зависимость массы металлоконструкции конвейера от варианта оптимального проектирования

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Использование при разработке металлоконструкций конвейеров с подвесной лентой подходов, основанных на оптимальном проектировании [1; 2], позволяет существенно улучшить их массогабаритные и стоимостные показатели.
2. Оптимальным сечением стержней и раскосов является прямоугольная труба, так как в ее сортамент включены значительно меньшие размеры по сравнению со швеллером.
3. При оптимальном проектировании узлов приводной и натяжной станций их масса снижается на 300–400 кг, из чего можно заключить, что при проектировании длинных конвейеров оптимизация этих узлов является несущественной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагереv, А.В. Универсальная методика оптимального проектирования металлоконструкций конвейеров с подвесной лентой / А.В. Лагереv, П.В. Бословяк // Вестн. Брян. гос. техн. ун – та. – 2014. – №1. – С. 31–36.
2. Лагереv, И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин / И.А. Лагереv, А.В. Лагереv. – Брянск: БГТУ, 2013. – 228 с.
3. Гончаров, П.С. NX для конструктора – машиностроителя / П.С. Гончаров, М.Ю. Ельцов, С.Б. Коршиков, И.В. Лаптеv, В.А. Осюк. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 500 с.
4. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП, 1990. – 176 с.

Материал поступил в редколлегию 20.03.14.