

УДК 621. 86

А.В. Лагерев, П.В. Бословяк

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КОНВЕЙЕРОВ С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ

Представлена методика оптимального проектирования конвейера. Выполнена оптимизация и проведен анализ металлоконструкции существующего варианта конвейера.

Ключевые слова: металлоконструкция, конвейер с подвесной лентой, оптимальное проектирование, оптимизация, целевая функция, ограничение.

В настоящее время на промышленных предприятиях основным средством непрерывного транспорта является традиционный ленточный конвейер. Но он, как показывает многолетняя практика, имеет существенные недостатки. В связи с этим была разработана новая конструкция специального ленточного конвейера – конвейера с подвесной лентой (КПЛ), в которой отсутствуют многие недостатки ленточных конвейеров обычного типа [1-3]. Данный конвейер является перспективным инновационным средством непрерывного транспорта.

Важной задачей при проектировании КПЛ является снижение металлоемкости. Оно может быть достигнуто как при оптимизации существующих машин, так и на предварительном этапе проектирования конвейеров.

Цель оптимального проектирования металлоконструкции (МК) конвейера заключается в максимальном использовании запаса работоспособности конструкции. Она достигается путем создания металлоконструкции, имеющей минимальную массу при выполнении требуемых условий прочности, жесткости и устойчивости, что приводит к снижению себестоимости конвейера в целом.

Типичная структурная схема КПЛ состоит из четырех конструктивных элементов (рис. 1), которые подразделяются на детали (стержни, раскосы, стойки). Анализ каждого из характерных элементов МК конвейера заключается в рассмотрении их с учетом наличия избыточных стержней и раскосов. В зависимости от технического задания на проектирование КПЛ металлоконструкция конструктивных элементов (рис. 2) будет многообразной, т.е. они будут иметь разное количество, длину и профиль поперечного сечения деталей.



Рис. 1. Структурная схема металлоконструкции конвейера с подвесной лентой

Детали металлоконструкции элементов КПЛ имеют поперечные сечения различной геометрической конфигурации. Оптимальными с точки зрения минимальной массы деталей при выполнении условий прочности и жесткости являются такие профили, как прямоугольная или круглая труба, швеллер и уголок.

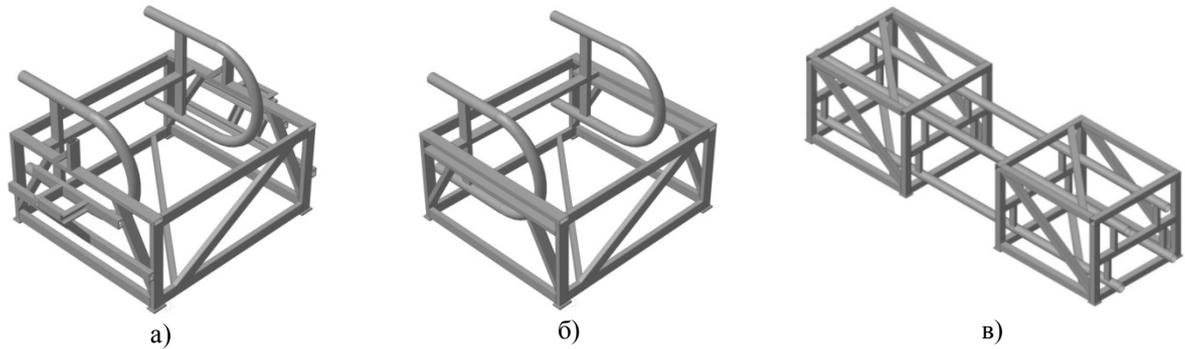


Рис. 2. Схемы металлоконструкций конвейера с подвесной лентой:  
а – приводной станции; б – натяжной станции; в – линейных секций

В общем виде масса металлоконструкции конвейера с подвесной лентой составляет

$$M = m_{нс} + m_{нс} + m_{лс} + m_n,$$

где  $m_{нс}$ ,  $m_{нс}$ ,  $m_{лс}$ ,  $m_n$  – масса МК приводной станции, натяжной станции, линейной секции и направляющей соответственно.

Металлоконструкция КПЛ характеризуется совокупностью значений геометрических характеристик его отдельных конструктивных элементов (размеры поперечного сечения и длины участков МК). Часть из них не подвергаются изменению (варьированию) в ходе отыскания оптимального результата, т.е. в процессе оптимизации этими параметрами либо невозможно, либо нецелесообразно управлять. К их числу относятся те, которые явно зависят от других параметров металлоконструкции, или уже определенные на ранних этапах расчета. К числу параметров, которые необходимо учитывать при расчете и проектировании металлоконструкции и которыми невозможно управлять, относятся также эксплуатационные нагрузки, определяемые техническим заданием на проектирование конвейера.

Помимо неуправляемых параметров также есть управляемые параметры МК, которые варьируются для поиска оптимального результата. Из этих параметров составляется вектор неизвестных размеров  $\{x\}$ , подлежащих определению. Найденный в процессе оптимизации вектор управляемых параметров  $\{x\}$  и вектор неуправляемых параметров  $\{z\}$  целиком определяют геометрические характеристики оптимальной металлоконструкции конвейера. Повышенного эффекта от процедуры оптимизации возможно добиться при наличии максимально возможного числа управляемых параметров, в результате чего можно ожидать существенного уменьшения металлоемкости оптимизируемой конструкции конвейера.

Задача оптимального проектирования металлоконструкции КПЛ в общем виде была сформулирована следующим образом: для конкретного варианта МК требуется найти такое сочетание ее варьируемых размеров, при котором достигается минимум веса с учетом ограничений по конструкции, прочности и жесткости.

$$U(\{x\}, \{z\}) \rightarrow \min;$$

$$e_m(\{x\}, \{z\}) \geq 0 \quad (m=1, \dots, M);$$

$$f_n(\{x\}, \{z\}) \geq 0 \quad (n=1, \dots, N);$$

$$g_p(\{x\}, \{z\}) \geq 0 \quad (p=1, \dots, P),$$

где  $C$  – целевая функция (вес МК конвейера);  $e_m, f_n, g_p$  – системы линейных и нелинейных ограничений по конструкции, прочности, жесткости на варьируемые размеры металлоконструкции конвейера соответственно.

Для создания универсальной целевой функции каждый элемент МК должен рассматриваться в отдельности. Проводится анализ возможного профиля поперечного сечения для каждой детали элемента, определяется число управляемых  $\{x\}$  и неуправляемых  $\{z\}$  параметров. После выполнения данной процедуры анализа для каждого элемента металлоконструкции конвейера составляется целевая функция, представленная ниже для одного из четырех элементов – приводной станции:

$$C(\{x_i^c\}, \{z_i^c\}) = \{j_1^n 8 \rho_1 z_1^n x_1^n (x_2^n + x_3^n - 2 x_1^n) + j_1^{m4} 4 \rho_1 z_1^m [x_1^m (x_2^m - 2 x_3^m) + 2 x_4^m x_3^m] + j_1^y 4 \rho_1 z_1^y x_1^y (x_2^y + x_3^y - x_1^y) + j_1^c 4 \rho_1 z_1^c x_1^c (x_2^c - x_1^c)\} + \dots + \{j_{17}^n 2 \rho_{17} x_{39}^n x_{39}^n (x_{60}^n + x_{61}^n - 2 x_{39}^n) + j_{17}^m \rho_{17} x_{69}^m [x_{70}^m (x_{71}^m - 2 x_{72}^m) + 2 x_{73}^m x_{72}^m] + j_{17}^y \rho_{17} x_{43}^y x_{46}^y (x_{47}^y + x_{48}^y - x_{40}^y) + j_{17}^c \rho_{17} x_{26}^c x_{27}^c (x_{28}^c - x_{27}^c)\},$$

где  $j_i^c$  – признак наличия детали в конструкции ( $j_i^c = 1$  – есть элемент;  $j_i^c = 0$  – нет элемента);  $i$  – деталь элемента конструкции;  $c = n$  – размер элемента прямоугольной трубы;  $c = m$  – размер элемента швеллера;  $c = y$  – размер элемента уголка;  $c = k$  – размер элемента круглой трубы;  $\rho_i$  – плотность детали;  $x_a^c, z_b^c$  – варьируемый и неварьируемый параметры МК;  $a, b$  – геометрический размер варьируемого и неварьируемого параметров МК.

После получения всего набора целевых функций составлена ее общая формула для КПЛ:

$$C(\{x\}, \{z\}) = C_1(\{x_i^c\}, \{z_i^c\}) + C_2(\{x_i^c\}, \{z_i^c\}) + C_3(\{x_i^c\}, \{z_i^c\}) + C_4(\{x_i^c\}, \{z_i^c\}),$$

где  $C_1(\{x_i^c\}, \{z_i^c\}), C_2(\{x_i^c\}, \{z_i^c\}), C_3(\{x_i^c\}, \{z_i^c\}), C_4(\{x_i^c\}, \{z_i^c\})$  – целевая функция МК приводной станции, натяжной станции, линейной секции и направляющей соответственно.

С учетом целевых функций всех элементов формируется система конструктивных, прочностных, жесткостных ограничений. Для каждого элемента конструкции они будут различные.

Конструктивные ограничения:

- для приводной станции: длины поперечных стержней больше длины обечайки приводного барабана; длины вертикальных стержней обеспечивают огибание конвейерной ленты на приводном барабане по криволинейной направляющей;
- для натяжной станции: длины поперечных стержней больше длины обечайки натяжного барабана; длины вертикальных стержней обеспечивают огибание конвейерной ленты на натяжном барабане по криволинейной направляющей; длина натяжной станции выбирается с учетом натяжения ленты для обеспечения необходимого перемещения натяжного барабана вдоль станции;
- для линейной секции: вертикальные стойки не рекомендуется устанавливать с шагом более 4 м, так как при его увеличении возрастают динамические усилия со стороны подвески на направляющую.

Прочностные ограничения [4]:

- при расчете на прочность элементов, подверженных центральному растяжению или сжатию силой  $N$ ,

$$\frac{N}{A_n} \leq R_y \gamma_c = \frac{R_{yn}}{\gamma_m} \gamma_c \tag{1}$$

- при расчете на прочность растянутых элементов конструкции из стали с отношением  $R_u/\gamma_u > R_y$ , эксплуатация которых возможна и после достижения материалом предела текучести,

$$\frac{N}{A_n} \leq \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u} = \frac{R_{un} \gamma_c}{\gamma_m \gamma_u}, \quad (2)$$

- при расчете на прочность элементов, изгибаемых в двух главных плоскостях,

$$\frac{M_x}{I_{xx}} y + \frac{M_y}{I_{yy}} x \leq R_y \gamma_c, \quad (3)$$

где  $N$  – продольная сила;  $A_n$  – площадь сечения;  $R_y$  – расчетное сопротивление материала растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы;  $R_{yn}$  – предел текучести материала;  $\gamma_m$  – коэффициент надежности по материалу;  $R_u$  – расчетное сопротивление материала растяжению, сжатию, изгибу по временному сопротивлению;  $\gamma_u$  – коэффициент надежности в расчетах по временному сопротивлению;  $R_{un}$  – временное сопротивление материала разрыву;  $M_x, M_y$  – изгибающий момент относительно осей  $x$  –  $x$  и  $y$  –  $y$  соответственно;  $I_{xx}, I_{yy}$  – момент инерции сечения относительно осей  $x$  –  $x$  и  $y$  –  $y$  соответственно;  $x, y$  – координаты рассматриваемой точки сечения относительно главных осей.

Условия жесткости металлоконструкции КПЛ, как правило, обеспечиваются избыточным количеством стержней и раскосов конструкции.

После получения целевой функции металлоконструкции конвейера и систем ограничений стал возможен процесс оптимизации, который реализован в среде CAD/CAM/CAE–подсистем SiemensNX [5].

Объектом оптимизации был выбран существующий ленточный конвейер с подвесной лентой, спроектированный и изготовленный сотрудниками ООО «Конвейер». Его конструкция состоит преимущественно из швеллеров № 6,5 (сталь 09Г2С), соединенных сваркой. Основные характеристики конвейера: длина – 97 м; производительность – 120 т/ч; ширина ленты – 800 мм, скорость – 1 м/с.

Начальным этапом оптимального проектирования является формирование исходных данных, представляющих собой трехмерные криволинейные эскизы участков металлоконструкции, соединенные воедино и выполненные в CAD – подсистеме NX. Схема МК конвейера условно упрощена включением в расчет только двух линейных секций, что никак не влияет на конечный результат оптимизации.

Предварительно разделив стержни и раскосы на соответствующие группы, каждой из которых задали определенное поперечное сечение с геометрическими параметрами, к эскизу подключили модуль NX Nastran, который разбил конструкцию конвейера на заданное число конечных элементов (рис. 3).

Далее установили жесткие закрепления – заделки. Нагрузки, действующие на конструкцию (от натяжения конвейерной ленты; от веса приводного, натяжного барабанов; от веса двигателя; со стороны подвесок, перемещающих ленту с грузом), заменены эквивалентными силами. Также для данного эскиза модели была учтена сила тяжести всей конструкции. Модулем NX Nastran выполнены расчеты МК конвейера на прочность и устойчивость, результаты которых представлены на рис. 4.

Как видно из результата расчета металлоконструкции, максимальные напряжения, возникающие в ней, равны 152 МПа, минимальные – до 6 МПа. Максимально возможные напряжения, при которых прочность МК будет обеспечена, для стали 09Г2С в соответствии с условиями (1– 3) составляют 290 МПа. Следовательно, данная конструкция обладает избыточной прочностью.

В результате проведенной оптимизации в программе NX получены оптимальные геометрические параметры деталей конструкции, представленной на рис. 5, которые удовлетворяют системе ограничений. Максимальные напряжения в оптимальном варианте МК возникают в креплении направляющей к приводной станции и равны 285 МПа, минимальные действуют в стержнях 2, 3 и раскосах 4, 5 и не превышают 10 МПа.

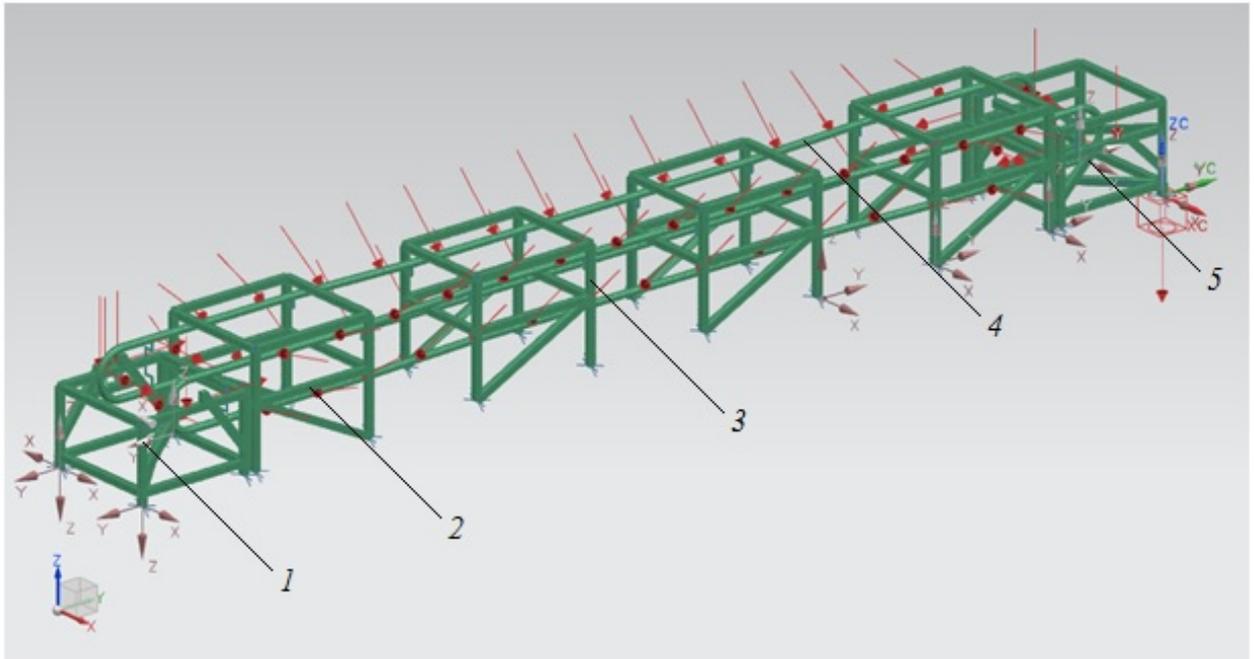


Рис. 3. Металлоконструкция КПЛ в среде NX Nastran до процедуры оптимизации: 1 – приводная станция; 2 – выполаживающий участок; 3 – линейная секция; 4 – направляющая; 5 – натяжная станция

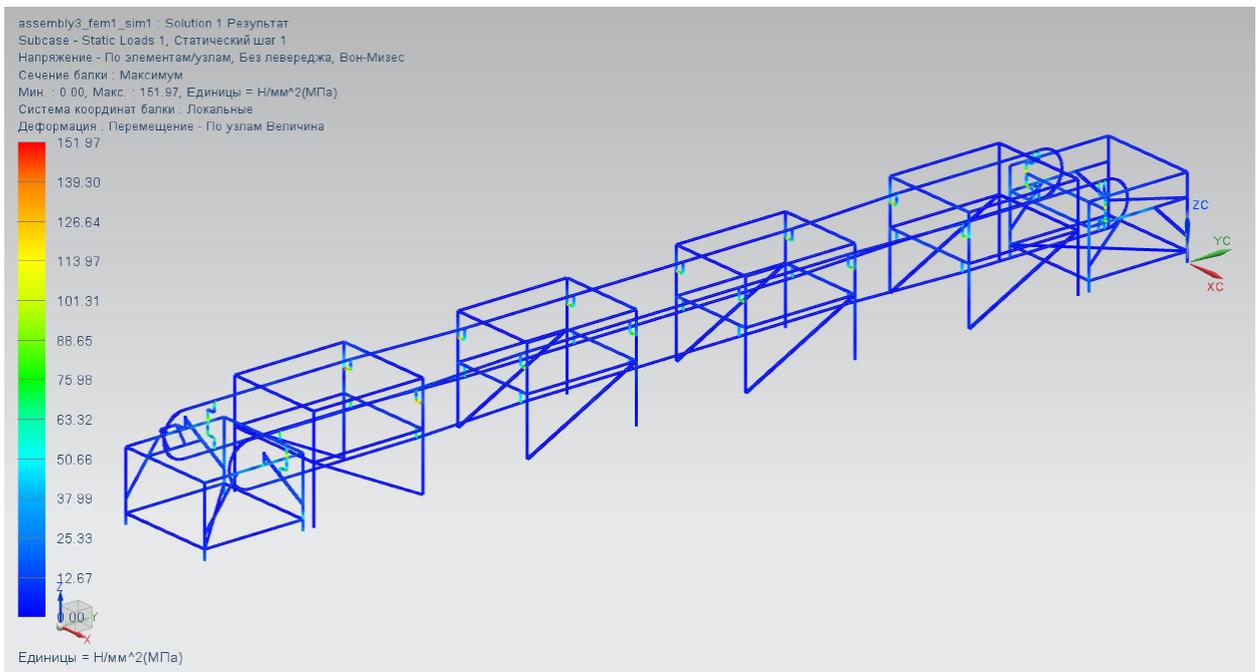


Рис. 4. Результат расчета металлоконструкции КПЛ в среде NX Nastran

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Использование оптимального подхода при проектировании металлоконструкции КПЛ позволяет значительно снизить ее материалоемкость по сравнению с традиционно проектируемыми конструкциями. В частности, для рассчитанного варианта конвейера масса его металлоконструкции после процесса оптимизации без исключения избыточных стержней и раскосов уменьшилась на 24%, или 1980 кг.

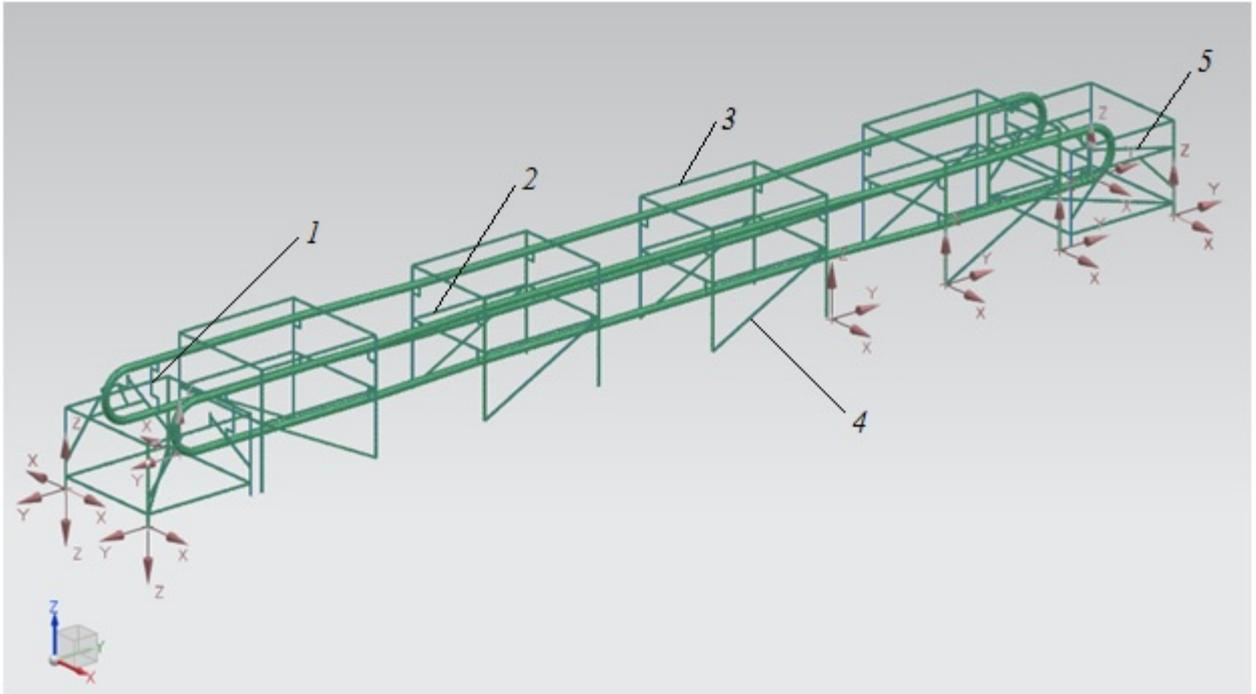


Рис. 5. Результат оптимизации металлоконструкции КПЛ: 1 – крепление направляющей к металлоконструкции; 2, 3 – продольный стержень; 4, 5 – раскос

2. Исследования конструкции показали, что самые большие напряжения возникают в элементах, к которым крепятся направляющие, и вблизи крепления этих элементов к несущей металлоконструкции конвейера.

3. Анализ металлоконструкции конвейера без учета продольных раскосов в линейной секции конвейера показал, что максимальные напряжения всей конструкции возросли на незначительную величину (меньше 2 МПа), в то время как масса металлоконструкции уменьшилась на 27%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков, В.И. Конвейеры с подвесной лентой / В.И. Аверченков, С.В.Давыдов, В.П. Дунаев, В.Н. Ивченко, С.В. Куров, М.Ю. Рытов, В.И. Сакало; под общ. ред. В.И. Аверченкова, В.Н. Ивченко. – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 256с.
2. Лагереv, А.В. Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой – инновационный вид машин непрерывного транспорта / А.В. Лагереv, В.П. Дунаев // Инженерный журнал. Справочник. – 2009. – №10 – С.9 – 14.
3. Лагереv, А.В. Динамические процессы при переходных режимах работы дискретного участка конвейера с распределенным приводом / А.В. Лагереv, Д.Ю. Кулешов // Вестн. Брян. гос. техн. ун – та. – 2013. – №2. – С.50 – 56.
4. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП, 1990. – 176 с.
5. Гончаров, П.С. NX для конструктора – машиностроителя / П.С. Гончаров, М.Ю. Ельцов, С.Б. Коршиков, И.В. Лаптеv, В.А. Осипюк. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 500 с.

Материал поступил в редколлегияу 9.12.13.