

1 – жесткая несущая рама; 2 – сферически корпус; 3 – шахта; 4 - соединительная муфта; 5 - крышка корпуса; 6 – ледобойный снаряд; 7 – двигатели; 8 – блок управления; 9 – полиуретановый пьж; 10 – электроразрядник; 11 – порошок; 12 – воздухопроводом; 13 – кабелем управления и электропитания; 14 – видеокамеры.

Рис. 1. Схема ледобойной установки

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Труды координационных совещаний по гидротехнике выпуск 56, Затопы и загоры на реках СССР и борьба с ними. – 5 стр.
2. Устройство для ликвидации заторообразования: РФ №2397911 Российская Федерация /Одинокое В.И., Прокудин А.Н. – 2008145808/11; заявл. 19.11.2008 опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24. – 5 с.
3. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

УДК 621.9.011:517.962.1

Якимович А.М., Довнар С.С., Шумский И.И.

#### **СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОРЕБРЕНИЯ ТРАВЕРС TOS И МЗОР ДЛЯ ПОРТАЛЬНЫХ СТАНКОВ КЛАССА «ГЕНТРИ»**

*Белорусский национальный технический университет, ОАО «МЗОР»*

*Минск, Беларусь*

*Проведен МКЭ-анализ траверс двух тяжелых порталных станков. Сопоставлены разные системы внутреннего оребрения. Обнаружено, что их потенциал примерно одинаков. Оценена податливость траверс к модам деформации – изгибу, кручению и перекосу. Показана необходимость оребрения сердцевин траверс для блокирования перекоса. Даны рекомендации по конструктивным изменениям, облегчению траверс и оптимизации ребер.*

Для современных порталных многоцелевых станков ведущим вариантом компоновки является схема «Гентри» [1]. В ней портал (gantry) возвратно-поступательно движется вдоль неподвижного стола с деталью. Схема реализована, в частности фирмой TOS и заводом МЗОР - станок «СуперГентри» (СГ) семейства МС640. Подвижный портал состоит (рис. 1.) из траверсы (поперечины), двух вертикальных стоек и двух саней с подвижными опорами и приводами снизу. Для точной работы станка важна жесткость портала. Здесь ключевую роль играет жесткость траверсы [2].

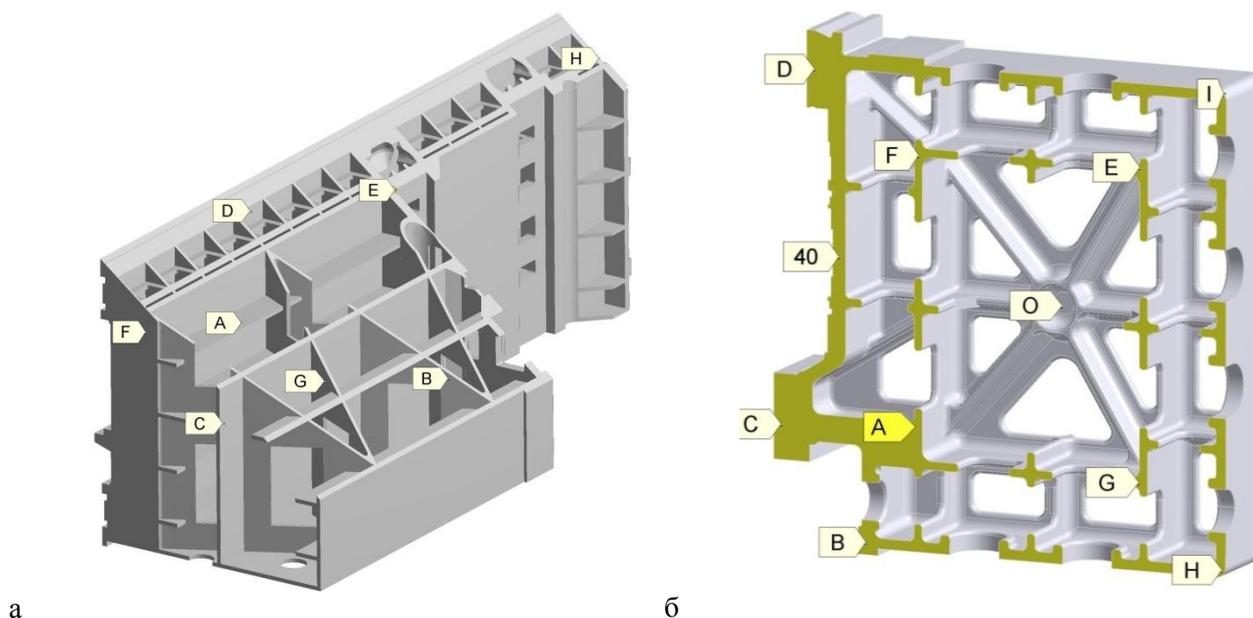


Характеристики траверс даны в табл.1. Габариты поперечных сечений почти одинаковы. Траверса СГ длиннее, так как она предназначена для большего рабочего пролета (определяется шириной стола станка) – 5400 мм вместо 4000 мм у TOS. Отчасти поэтому масса траверсы СГ на 47% больше. Кроме того, у траверсы СГ на 76% больше опорный пролет (расстояние между правым и левым винтами Y). Это связано с конструктивным решением – у «СуперГентри» винт проходит посередине передней стороны стойки. В портале TOS винт расположен на внутренней стороне стойки, максимально близко к средней плоскости станка.

**Таблица 1 - Массо-габаритные характеристики траверс**

Параметр	TOS	МЗОР «СГ»	Различие, раз
Масса траверсы $m_T$ , кг	15134	22358	1,47
Длина полная (вдоль X) $L_n$ , мм	7650	8570	1,12
Длина рабочего пролета, мм	4000	5400	1,35
Сечение траверсы (Z*Y), мм	1230*1400	1220*1410	$\cong 1$
Опорный пролет (расстояние между вертикальными винтами), мм	3720	6574	1,76

**Примененные методы оребрения траверс.** Оребрение обеих траверс является сквозным (на всё сечение) и сложным. Оно создается на стадии литья. По литейным соображениям (проливаемость, размещение формовочных стержней) в ребрах и стенках сделаны окна и проемы.



**Рис. 3. Внутреннее оребрение траверс TOS (а) и СГ (б – один полупериод)**

На рис. 3. а видны в разрезе три метода оребрения траверсы TOS:

- горизонтальные полки А перекрещиваются с вертикальными мембранами С (это перекрестный принцип оребрения);
- вертикальные стенки В, Г поставлены под острым углом друг к другу и образуют треугольный рисунок с периодом 980 мм (треугольная методика оребрения);

Предняя стенка D траверсы дополнена второй, параллельно расположенной стенкой по линии FEH. Это методика двойной стенки. Внутри стенка усилена локальной кессонной системой ребер (вертикальные и горизонтальные ребра образуют «ящики» - кессоны).

Передняя стенка траверсы имеет переменную толщину в диапазоне 40-67 мм. Остальные стенки и все внутренние мембраны и ребра отлиты с толщиной  $t_p = 20 \text{ мм}$ . Такая важная литейная характеристика как отношение высоты ребра  $h_p$  к толщине достигает местами. На большинстве ребер и стенок  $k_L = 6 \div 10$ . Погонная масса траверсы в пролетной части равна Оребрение траверсы TOS можно описать формулой «полки + треугольники».

На рис. 3. б представлено оребрение траверсы СГ. Оно является регулярным и имеет малый шаг периода – 500 мм длины траверсы. На рис. 4. б показана система ребер на половине периода (250 мм). Реализована методика двойного короба (двойная стенка по кругу). В результате внутри наружного короба ВДИН возник вложенный короб AFEG. Короба связаны друг с другом кессонами (12 кессонов на рис. 3 б). Их формирует перекрестная система ребер. Внутри короба AFEG по треугольному принципу создана «звездочка» из шести ребер-балок с центром О. Формулу оребрения траверсы СГ можно назвать «двойной короб + звездочка».

Направляющие суппорта отмечены точками С, D. Передняя стенка CD имеет характерную толщину только 40 мм, но связана по кессонному принципу со стенкой AF. Связующие ребра имеют толщину 25 мм и высоту 55-120 мм. Наружные стенки DI, IH, HB обладают толщиной 30 мм. Поэтому отношение высоты ребра к толщине меньше, чем у TOS и не превышает .

Погонная масса траверсы СГ в пролетной части равна  $m_{II}^{CG} = 2950^{кг} / \text{п.м.}$ . Это на 30% больше, чем у TOS. Одна из причин этого – недостаточно тонкое литье, малое отношении высоты многочисленных ребер к их толщине.

**Исходные данные для моделирования траверс.** Для расчетов обоих траверс были приняты свойства чугуна: модуль упругости  $E_C = 130 \text{ ГПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\mu_C = 0,3$ ; плотность. Для стали принят модуль упругости  $E_{CT} = 200 \text{ ГПа}$ , а плотность  $m_{CT} = 7850^{кг} / \text{м}^3$ . Для суппорта взят модельный материал с модулем упругости, на порядок большим, чем у стали. Плотность материала назначалась так, чтобы управлять массой суппорта. В базовом варианте  $m_{cyn} = 5 \text{ т}$ .

Податливость опор качения отображалась через понижение модуля упругости до  $E_{OP} = 5 \text{ ГПа}$ . Согласно каталогу обеспечивалась жесткость опор  $j_{OP} = 3000^H / \text{мм}$ .

**Постановка задачи компьютерного моделирования траверс.** Методом конечных элементов решалась линейная статическая задача. Нелинейные эффекты (большие перемещения, трение скольжения, пластическое течение) не рассматривались. По геометрической модели строилась сетка конечных элементов. Применялись объемные конечные элементы с тетраэдрической и гексаэдрической формой. Элементы соединялись в сетку узлами. Каждый узел имел три степени свободы. Решение задачи достигалось путем решения системы линейных уравнений. На выходе задачи для всех точек модели вычислялись перемещения, напряжения и деформации.

Перемещения в ключевых точках траверсы и суппорта обрабатывались по методикам [4]. В картине деформаций выделялись ключевые деформационные моды (способы деформирования). Оценивались вклады и роли каждой моды в общей картине деформаций. Забегая вперед сообщим, что, как и в работе [4], обнаружено три ведущие деформационные моды – изгиб траверсы (в плоскости XY – рис. 4.), кручение траверсы вокруг оси, параллельной X, и перекося сечения траверсы в плоскости YZ (прямоугольники становятся параллелограммами). Соответственно ниже согласно методикам [4] будут оцениваться:

для моды изгиба - усредненное перемещение в среднем сечении или ;

для моды кручения - угол поворота среднего сечения ;

для моды перекося - угол перекося среднего сечения .

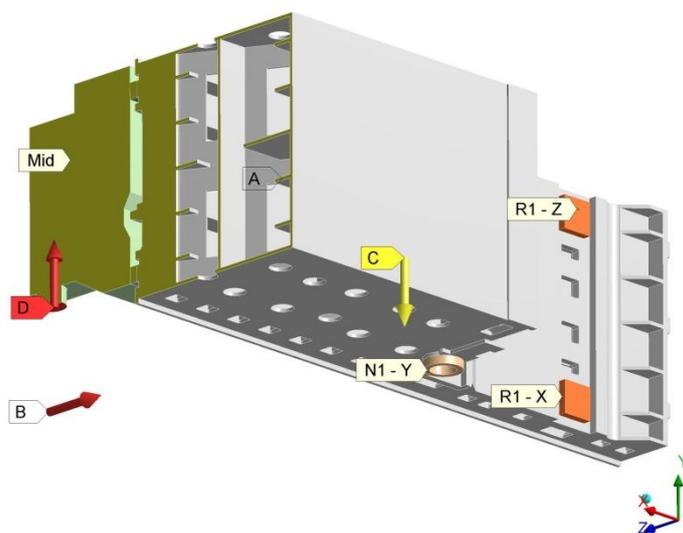
Также отслеживаются угол поворота шпинделя  $\alpha_{III}$  и перемещение конца шпинделя – суммарное  $\delta_{сум}^{un}$ , продольное  $\delta_z^{un}$  и вертикальное  $\delta_y^{un}$ .

**Граничные условия в МКЭ-расчетах.** Граничные условия для траверсы TOS показаны на рис. 4. Для траверсы СГ условия аналогичны. Ось X является поперечной для станка и направлена вдоль траверсы. Перпендикулярно X запрещены перемещения (A) в среднем сечении Mid как на суппорте, так и на самой траверсе. Это обеспечивает симметричность расчетной задачи. На нижнем торце гайки (N1-Y) запрещено перемещение вертикально, по Y. Так моделируется соединение гайки

с винтом. По большим площадкам опор качения (R1-Z) заблокированы перемещения вдоль продольной оси станка Z. Это сделано для учета стойки.

Стандартная опора качения ограничивает перемещения по двум степеням свободы. Поэтому запрещены смещения по X на боковых сторонах опор качения (R1-X).

В работе рассмотрено три варианта нагружения траверсы (load cases - LC):



A – условие симметрии по средней плоскости Mid; B – продольная тестовая сила;  
C – сила тяжести; D – вертикальная тестовая сила

Рис. 4. Нагрузки и закрепления на симметричной половине траверсы TOS

LC-weight – все объекты нагружены только силой тяжести (C на рис. 4.); суппорт массой 5 тонн создает на траверсу эксцентричную нагрузку;

LC-Z – присутствует только продольная тестовая сила  $F_z = -1000 \text{ Н}$  (B на рис. 4.), которая моделирует продольную компоненту силы резания. Сила приложена на плече 0,6 м ниже торца шпинделя, что моделирует удаленную установку инструмента на оправке;

LC-Y – присутствует только вертикальная тестовая сила  $F_y = 1000 \text{ Н}$  (D на рис. 4.), которая имитирует отжимающее действие инструмента, например, торцевой фрезы.

Величины сил даны для половинного базиса. Для всей траверсы они должны быть удвоены. Указанные силы типичны для чернового фрезерования и весьма редко превышаются на практике. Силы в случаях LC-Z и LC-Y создают одинаковые по величине и противоположные по направлению крутящие моменты относительно оси траверсы.

**Анализ деформации траверс под собственным весом.** Траверсы были нагружены собственным весом в соответствии с вариантом нагружения LC-weight. При этом рассмотрено четыре геометрических случая:

GC-1 – траверсы в исходном состоянии. Соотношение опор качения «6 (TOS) к 4 (СГ)»;

GC-2 – траверса СГ укорочена на период оребрения (500 мм) и почти равна по длине TOS. Соотношение опор качения «6 к 4»;

GC-3 – как GC-2, но с одинаковым уменьшенным числом опор «4 к 4»;

GC-4 – как GC-2, но с одинаковым увеличенным числом опор «6 к 6»;

GC-5 – как GC-1, траверса СГ имеет исходную длину и целых 6 опор.

Для исходного состояния деформированные траверсы TOS и СГ представлены на рис. 5. а, б соответственно (масштабирование перемещений - 4000 раз). Данные о перемещениях размещены в табл.2 (строка GC-1). Перемещение на конце шпинделя TOS (76,1 мкм) вдвое меньше, чем на шпинделе СГ (145,6 мкм). Получается, траверса СГ вдвое податливее. Однако, это еще не говорит преимуществе системы оребрения TOS. Траверса СГ длиннее на 1,35 раза, тяжелее в 1,47 раза, закреплена только в 4-х опорах вместо 6-ти.

Оценим проявление мод изгиба, кручения и перекоса при нагружении обеих траверс собственным весом. Визуально, перекося сечения не заметен на рис. 5. а, б. Траверса СГ (рис. 5. а)

сильно прогибается по сравнению с TOS. Это видно по соотношению параметров  $h_{\text{шп}}^{\text{пр}}$  в табл.2. В то же время траверса TOS больше поддается закручиванию. Её угол наклона шпинделя  $\alpha_{\text{шп}} = 26,9 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$  почти вдвое больше, чем у СГ ( $\alpha_{\text{шп}} = 14,0 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$ ).

Траверса СГ была виртуально укорочена на период оребрения (500 мм). Длины утолщенных частей траверсы TOS и СГ стали почти одинаковыми. В соответствующей строке (GC-2) табл.2 различия между конструкциями сразу уменьшились.

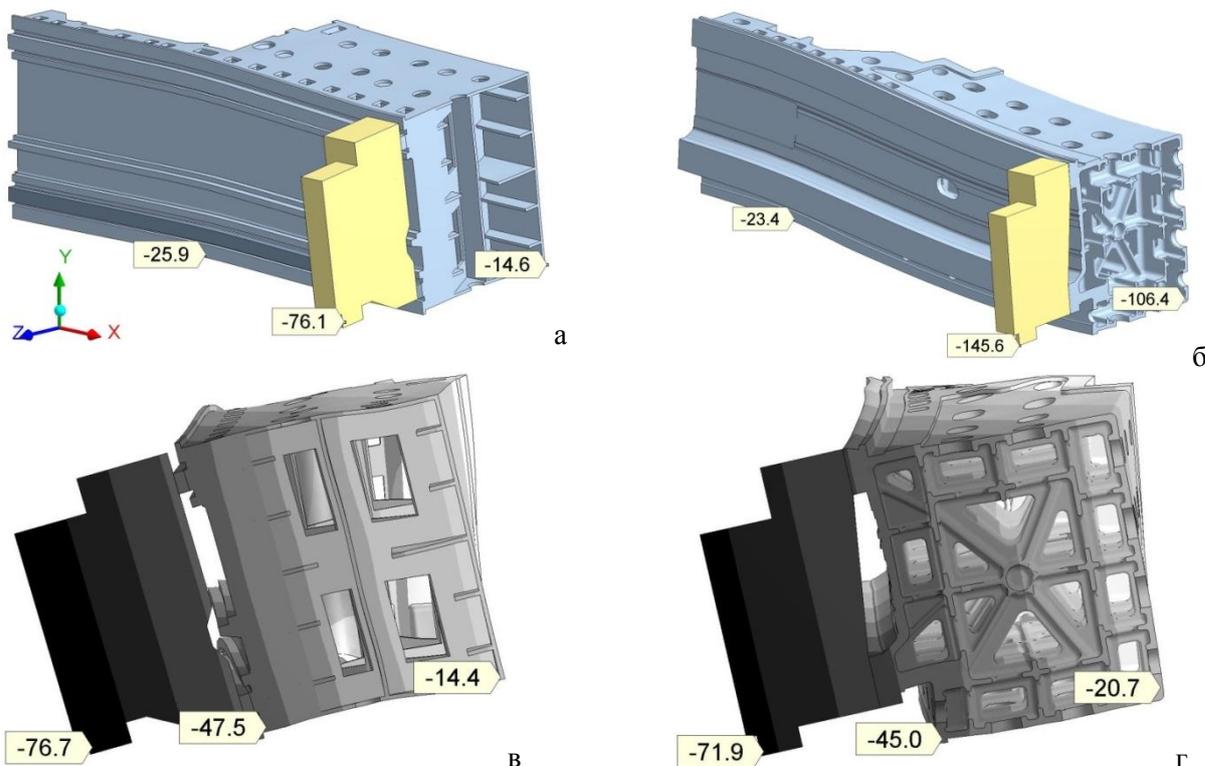


Рис. 5. Вертикальные перемещения  $\delta_y$  (мкм) под собственным весом в траверсе TOS (а, в), исходной траверсе СГ (по GC-1) (б) и в укороченной (по GC-4) траверсе СГ с 6-тью опорами (г)

**Таблица 2 - Вертикальное перемещение  $\delta_y$  (мкм) траверс TOS и СГ (в скобках) при нагружении силой тяжести по варианту LC-weight (точки по рис. 3. б)**

Геометрический случай	(на конце шпинделя)	$\delta_y$ в D (угол сверху спереди)	$\delta_y$ в В (угол снизу спереди)	$\delta_y$ в Н (угол снизу сзади)	(средний прогиб сечения)	(угол наклона шпинделя), $\text{рад} \cdot 10^{-6}$
GC-1	-76,13 (-145,6)	-47,94 (-127,0)	-47,85 (-106,41)	-14,69 (-33,62)	31,27 (114,22)	26,9 (14,0)
GC-2	-76,13 (-106,5)	-47,94 (-90,39)	-47,85 (-85,09)	-14,69 (-69,78)	31,27 (77,43)	26,9 (13,7)
GC-3	-95,36 (-106,5)	-55,17 (-90,39)	-54,9 (-85,09)	-6,28 (-69,78)	30,59 (77,43)	39,5 (13,7)
GC-4	-76,13 (-71,93)	-47,94 (-48,93)	-47,85 (-45,01)	-14,69 (-20,78)	31,27 (32,89)	26,9 (21,7)

Ещё ближе становятся результаты, если обеим траверсам дать одинаковое количество опор (строки GC-3 и GC-4 – по 4 и по 6 опор). В последнем случае данные по траверсам почти полностью выравниваются. Траверса СГ немного превосходит TOS, особенно по крутильной жесткости. Однако она остается на 28% более материалоемкой.

Следовательно, при сопоставимых размерах и достаточном закреплении системы оребрения TOS и СГ обладают примерно одинаковой эффективностью.

**Анализ нагружения траверс силами резания.** В этом разделе рассматривается влияние на траверсу тестовых сил резания. Остальные нагрузки не учитываются. Траверсу и суппорт считаем невесомыми. При необходимости воздействия от разных нагрузок можно просто суммировать, поскольку решаемые МКЭ-задачи являются линейными.

Траверса TOS будет рассмотрена в исходном состоянии, а траверса СГ – с 6-тью опорами качения на каждом конце (вариант GC-5). Так сделано потому, что в предыдущей серии расчетов стало понятно – четырех опор траверсе СГ просто не хватает для надежной фиксации конца.

На рис. 6. а дана картина эквивалентных напряжений в траверсе TOS для случая LC-Z. Напряжения не превышают 1,9 МПа и не угрожают прочности конструкции. Относительно высокие напряжения наблюдаются в районе шпинделя (1), а также на перемычках между окнами (2). Траверса TOS имеет опасную конструктивную особенность – развитый внутренний угол по линии 3 – 4. Вообще говоря, такой угол должен быть концентратором напряжений. Однако, как показывает МКЭ-анализ на рис. 6, а, опоры траверсы сдерживают напряжения в угле. В районе 3 эквивалентное напряжение не превышает 0,2 МПа. Это немного даже для чугуна.

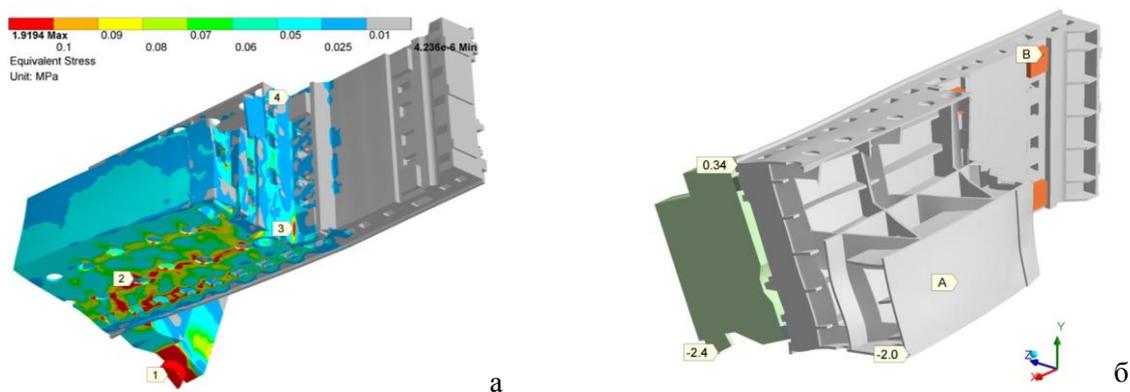


Рис. 6. Картины эквивалентных  $\sigma_e$  (МПа) напряжений (а) и продольных (мкм) перемещений  $\delta_z$  (б) в траверсе TOS при продольном нагружении силой  $F_z = -1000 \text{ Н}$  по LC-Z (четверть сечения траверсы условно вырезана)

Рис. 6. б показывает деформационные перемещения в траверсе TOS на виде сверху с разрезом. Визуально траверса довольно устойчива к изгибу, но поддается моде кручения. Результат надо сопоставлять с картиной для траверсы СГ (рис. 7. б). Параметры деформации приведены для TOS и СГ в табл.4 в строках 1, 2.

Изгибное смещение траверсы в среднем сечении составило  $h_z^{cp} = 0,95 \text{ мкм}$ . Угол наклона шпинделя  $\alpha_{шп} = 2,28 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$ , угол поворота сечения  $\alpha_{пов}^{cp} = 1,35 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$ , угол перекоса  $\alpha_{пов}^{cp} = 0,41 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$ . По большинству этих параметров траверса СГ оказывается жестче в 1,32-1,59 раз (табл.7). Перекос профиля у СГ почти втрое меньше, чем у TOS.

Получается, что более длинная, но хорошо закрепленная траверса СГ однозначно выигрывает по жесткости. Правда, она проигрывает TOS по массе.

Общеизвестно, что в балочных деталях, работающих на изгиб и кручение, существенными являются наружные стенки и непосредственно прилегающие к ним усилительные элементы, например, ребра. В обоих же рассматриваемых траверсах оребрение является сквозным. Оно заполняет и сердцевину траверс тоже. Возникает вопрос, нужно ли оребрение в сердцевине и можно ли отказаться от него без потери жесткости? Если сердцевина не выполняет усиливающей функции, то отказ от нее экономит массу траверс.

Для ответа на поставленный вопрос с помощью МКЭ была проведена серия виртуальных испытаний. В сердцевине траверсы делались глубокие прямоугольные вырезы размерами от 528×742 мм (рис. 7. в) до 720×1140 мм (рис. 7. г). В части случаев оребрение сердцевины, попавшее в вырез, просто убиралось (рис. 7.). В других случаях, оребрение оставалось, но ему приписывался иной модуль упругости  $E_{сер}^{mp}$ . Понижение этого модуля относительно модуля упругости  $E_C$  чугуна приближенно имитировало более тонкие и узкие ребра в сердцевине.

**Таблица 3 - Жесткость траверс при разных вариантах исполнения их сердцевины**

Параметр	Варианты траверс				
	1	2	3	4	5
Параметр	TOS (исходная)	СГ (GC-5)	СГ - вырез 528×742 мм	СГ - вырез 688×902	СГ - вырез 720×1140
Масса траверсы $m_T$ , кг	15134	22358	21480	20036	19264
Перемещение вертикальное, мкм	2,64	2,58	2,61	2,74	2,95
Перемещение продольное, мкм	-2,4	-2,61	-2,9	-3,41	-4,22
Жесткость вертикальная, Н/мкм	758	775	766	730	678
Жесткость продольная, Н/мкм	833	766	690	587	474
Параметр Жесткость/Масса, Н/мкм/кг $10^{-3}$	550	342,7	321,0	292,7	246,0

Результаты расчетов по траверсам с вырезами приведены в табл.3 и на рис. 7. Столбцы 1,2 в таблице и рис. 7. а, б относятся к исходному состоянию траверс. Столбцы 3-5 табл.3 описывают влияние разных вырезов. Параметры мод деформации даны в табл.4. Её строки 1, 2, 4 соответствуют столбцам 1, 2, 5 табл.3.

На рис. 7., а показана деформация траверсы СГ под действием вертикальной тестовой силы  $E_Y = 1000 Н$  (LC-Y, GC-5 – траверса). Конец шпинделя перемещается на 2,58 мкм (близко к результату для TOS – 2,64 мкм). Траверса подвергается, в основном, кручению. Линия ВАОЕ поворачивается по ч. с. Перекос сечения минимален.

На рис. 7. б дана картина перемещений той же траверсы при воздействии продольной силы  $E_Z = -1000 Н$  по LC-Z. Ведущей модой опять оказывается кручение (пр. ч. с.). Однако заметен перекас сечения, угол САВ перестает быть прямым. Характеристики мод деформации даны в табл.4, строке 2.

Прямоугольный вырез размерами 528×742 мм является отказом от «звездочки» в сердцевине траверсы (рис. 7. в) при сохранении внутреннего короба. Видно, что происходит существенный перекас. Внутренний короб становится параллелограммом, диагональ АЕ уменьшается, угол САВ становится все более острым. В районе А хорошо заметно выпучивание двойной стенки внутрь сердцевины.

Если полость внутри траверсы ещё больше расширить и убрать, в основном, внутренний короб, то мода перекаса становится ведущей (рис. 7. г; табл.4, строка 4). Смещение конца шпинделя достигает 4,2 мкм (рост на 61% по сравнению с рис. 7. б). Сечение траверсы стремится к ситуации «схлопывание параллелограмма». Показатель перекаса  $\alpha_{пер}^{cp}$  увеличивается в 8,93 раза, достигая вместо  $0,14 \cdot 10^{-6} рад$ .

Итак, оребрение в сердцевине траверсы нужно для сдерживания моды перегиба. Вариантом оребрения может быть «звездочка». Особенно важно блокировать перегиб траверсы вблизи текущего положения суппорта. Оребрение сердцевины не имеет большого влияния на моды изгиба и кручения.

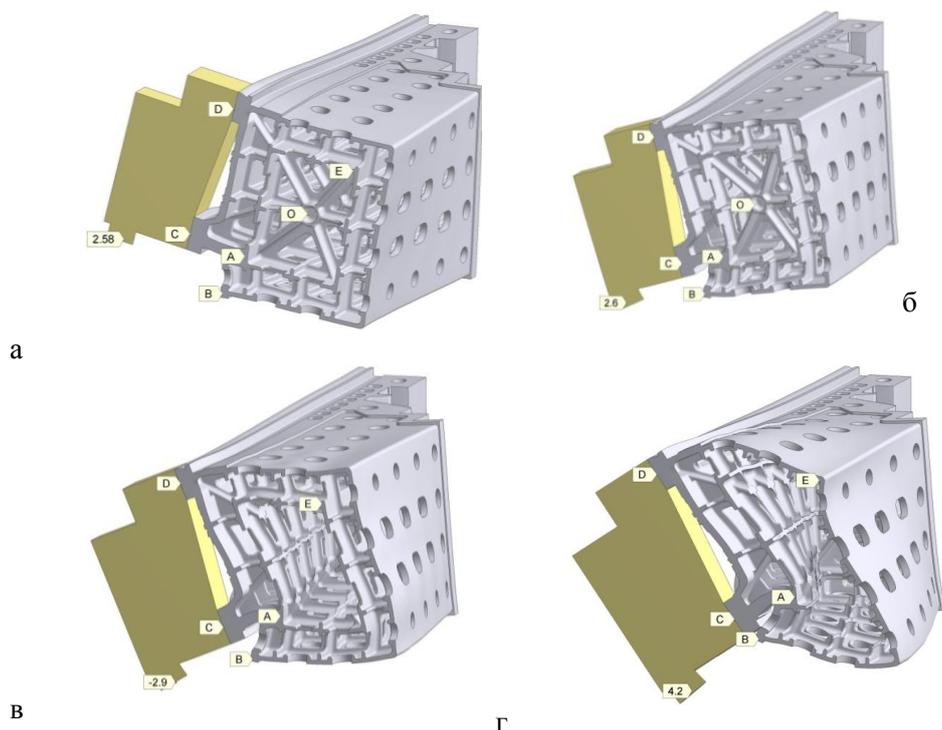


Рис. 7. Картины суммарных перемещений  $\delta_{\text{сум}}$  (мкм,  $\times 150000$ )

при продольном нагружении силой  $E_Y = 1000 \text{ Н}$  по LC-Y (а) и силой  $E_Z = -1000 \text{ Н}$  по LC-Z (б, в, г) в траверсе СГ (варианты по табл.3: 2 – а, б; 3 – в; 5 – г)

Вырез в сердцевине даёт небольшой эффект в смысле экономии массы. Вес траверсы снижается не более чем на 3094 кг (14%). При этом ухудшается отношение жесткости к массе  $k_{jm}$ . На графиках рис. 8. видно, что к вырезу наиболее чувствительна жесткость траверсы в продольном направлении. При увеличении площади выреза выигрыш по массе перекрывается проигрышем по жесткости. Поэтому кривая  $k_{jm}$  падает, что нежелательно для статического и динамического качества станка.

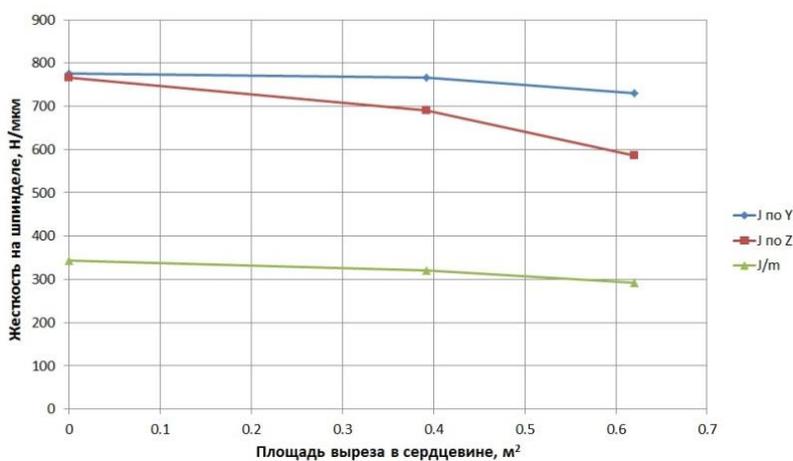
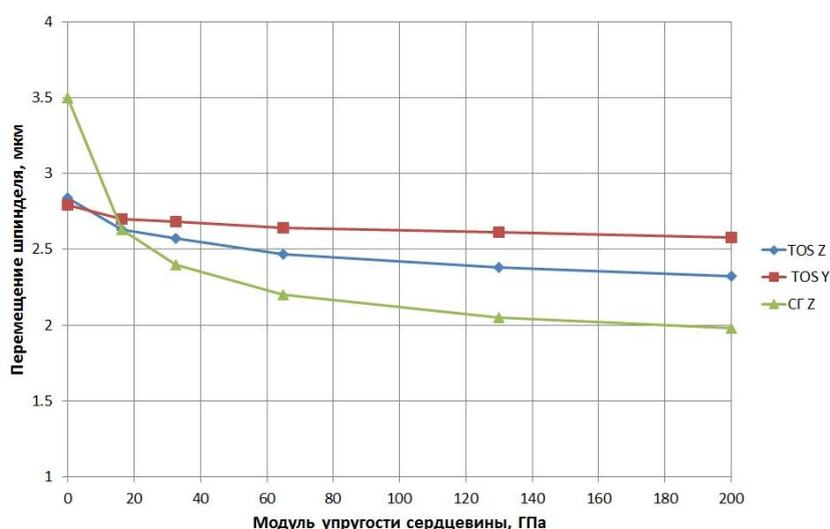


Рис. 8. Влияние площади выреза в сердцевине траверсы СГ на жесткость шпинделя: «J по Y» – сила по Y, LC-Y, жесткость ; «J по Z» - сила по Z, LC-Z, жесткость ; «J/m» - сила по Z, LC-Z, параметр «Жесткость/Масса»  $k_{jm}$

Итак, сквозное оребрение траверс необходимо. Делать существенные по площади вырезы не следует. Однако можно оптимизировать оребрение. Оказывается, что облегчение ребер в сердцевине до определенного предела почти не снижает жесткость на шпинделе. Это показано в серии МКЭ-расчетов (рис. 9.), где меняли модуль упругости материала сердцевины  $E_{сер}^{mp}$ . Модуль варьировался внутри условного параллелепипеда сечением 500×1050 мм. Например, снижение модуля упругости до  $E_{сер}^{mp} = 16,25 ГПа$  (1/8 от модуля упругости чугуна) приблизительно соответствует утонению ребер в сердцевине в 8 раз. Характеристики деформации для этого случая приведены в табл.4 в строке 3. Смещение и поворот шпинделя возросли на 30% относительно исходной ситуации (строка 2). Но облегченное в 8 раз оребрение – гораздо лучше, чем вырез (строка 4), когда жесткость на шпинделе падает в 1,8 раза.

**Таблица 4 - Параметры деформации траверс для продольного нагружения (LC-Z) в исходном состоянии (1, 2), с сердцевиной пониженного модуля упругости (3) и с вырезом вместо сердцевины (4)**

№	Траверса	Перемещение шпинделя, мкм	Поворот шпинделя, рад $10^{-6}$	Перемещение среднего сечения, мкм	Поворот среднего сечения, рад $10^{-6}$	Перегиб в среднем сечении, рад $10^{-6}$
1	TOS (исходная)	-2,39	-2,28	-0,95	-1,35	0,41
2	СГ (исходная)	-2,02	-1,65	-0,72	-0,85	0,14
3	СГ,	-2,63	-2,16	-0,81	-0,86	0,35
4	СГ, вырез 720×1140мм	-3,65	-3,34	-0,89	-0,83	1,26



TOS Y – траверса TOS, сила по Y, LC-Y, перемещение  $\delta_Z^{un}$  ;

TOS Z – траверса TOS, сила по Z, LC-Z, перемещение  $\delta_Z^{un}$  ;

СГ Z – траверса СГ, сила по Z, LC-Z, перемещение  $\delta_Z^{un}$  .

Рис. 9. Влияние условного модуля упругости сердцевины  $E_{сер}^{mp}$  траверсы на перемещение шпинделя

Рис. 9 показывает, что траверса TOS малочувствительна в смысле жесткости к состоянию сердцевины. Для траверсы СГ слишком сильное облегчение сердцевины нежелательно. Однако до уровня «1/4 модуля упругости чугуна» ( $E_{сер}^{mp} = 32,5 ГПа$ ) ослабление ребер вполне допустимо. Следовательно, траверса СГ имеет потенциал по облегчению веса и оптимизации системы оребрения, особенно, в сердцевине.

#### **Выводы.**

1. Сопоставлены формулы оребрения «полки + треугольник» (TOS) и «двойной короб + звездочка» (МЗОР «СГ») для усиления коробчатых траверс. Оба решения имеют близкий потенциал и являются конкурентами.

2. В текущей конструктивной форме обе траверсы обладают сопоставимой жесткостью. Траверса TOS лучше сопротивляется моде изгиба, а траверса СГ – модам кручения и перекоса. При увеличении числа опор у траверсы СГ до 6, она обходит TOS по жесткости, но уступает по материалоемкости.

3. Обе траверсы требуют наличия оребренной сердцевины траверсы. Особенно важно сквозное оребрение для траверсы СГ. При полой сердцевине мода перекоса активизируется и выходит на передний план. «Звездочка» из ребер в траверсе СГ является эффективным препятствием перекосу.

4. Оребрение траверс в сердцевине является избыточным (особенно СГ). Жесткость сердцевины можно понизить без существенного проигрыша в жесткости на шпинделе. Для облегчения оребрения и выигрыша в массе важно перейти на технологии тонкого литья для траверсы СГ. Второй вариант – исполнить траверсу как стальную сварную структуру с применением точной сварки, например, лазерным лучом.

5. Для усиления траверсы СГ требуется приблизить место опирания на винт к средней плоскости станка, а число опор качения увеличить с 4-х до 6-ти.

6. Перспективно оптимизировать параметры оребрения в траверсе СГ. Это касается размеров внутреннего короба, толщин и высот отдельных ребер, а также шагов между ними.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кирайдт, Ю.Н. Продукция УП «МЗОР» / Ю.Н. Кирайдт // Машиностроение-2010: технологии – оборудование – инструмент – качество: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7 – 8 апреля 2010 г. / Минск: Бизнесофсет, 2010. – С. 91 – 92.

2. Козловский, Н.А. Жесткость и виброустойчивость тяжелых фрезерных станков / Н.А. Козловский, М.П. Зайкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 135 с.

3. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.

4. В.И. Туромша, С.С. Довнар, А.С.Трусковский, Туми Эль-Мабрук Абужадар Али. Анализ эффективности оребрения траверсы продольно-фрезерного станка с подвижным порталом // Вестник Белорусского Национального технического университета, №6, 2011, с.19-28.