

6. Астафьев, В. И. Нелинейная механика разрушения / В. И. Астафьев, Ю. Н. Радаев, Л. В. Степанова // Самара: Изд-во «Самарский университет». – 2001. – 562 с.

7. Корн, Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн // М.: Наука. – 1973. – 832 с.

Поступила 07.04.2020

УДК 658.512

Колесников Л.А.

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ЖЕСТКОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ НАПРАВЛЯЮЩИХ КАЧЕНИЯ

Белорусский национальный технический университет,

Минск, Беларусь

Предложена методика оценки жесткости направляющих качения в зависимости от направления действия нагрузки на основе МКЭ-анализа. Проведен тестовый МКЭ-расчет роликовых направляющих качения фирмы Rexroth. Показано, что значения жесткости в каталогах производителя при боковой нагрузке существенно завышены и выявлены причины этого явления. Проведена оценка уровня снижения ресурса направляющих при направлении действия нагрузки, отличном от вертикального.

Введение. Важнейшие характеристики станка – точность и долговечность – в значительной степени определяются правильным выбором направляющих. В настоящее время это, как правило, направляющие качения. Жесткость и ресурс направляющих существенно (~1,5...1,7 раза) падают [1, 2] при отклонении направления действия нагрузки от номинального (сверху вниз). К сожалению, производители направляющих предоставляют значения жесткости, как правило, только в прямом (рабочем) направлении. Поэтому актуальна оценка фактической жесткости направляющих при произвольном направлении действия нагрузки.

Методики исследований. Для оценки характера изменения жесткости направляющих от направления действия нагрузки была разработана МКЭ-модель тестовой направляющей. В этом качестве использовалась направляющая Rexroth серии 1851 типоразмера 45 с роликовыми телами качения и натягом 0,08. Для этих направляющих производитель публикует значения жесткости, как в прямом, так и в боковом направлении. В соответствии с [1] жесткость направляющей принята равной: в вертикальном направлении – $j_Y = 1833$ Н/мкм; в горизонтальном – $j_X = 1143$ Н/мкм.

Твердотельная псевдоплоская МКЭ-модель тестовой направляющей качения включает в себя опорную рельсу, саму каретку и упругие тела (1...4), моделирующие тела качения (рис. 1, а). Тело каретки и рельса выполнены из стали ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$), а модуль Юнга упругих тел подбирался таким образом, чтобы эквивалентная жесткость модели направляющей в вертикальном направлении была равна заданной j_Y . Между упругими телами и дорожками тел качения задавалось условие контакта «Frictionless», верхние опорные площадки каретки жестко фиксировались, для торцевых поверхностей задан запрет на перемещение в нормальном направлении. Предварительный натяг 0,08 С, где С – динамическая грузоподъемность, $C = 92300$ Н, обеспечивался формированием термоупругих напряжений в упругих телах 1...4.

Основные результаты. Тестовая сила F , эквивалентная 17762 Н, принималась из условия $F < 2,5 \cdot 0,08 C$ [2] и прикладывалась к нижней поверхности рельсы. Ее направле-

ние менялось на угол от 0° до 90° относительно вертикальной оси. Типичное распределение эквивалентных напряжений и деформация модели под нагрузкой приведена на рис. 1, б.

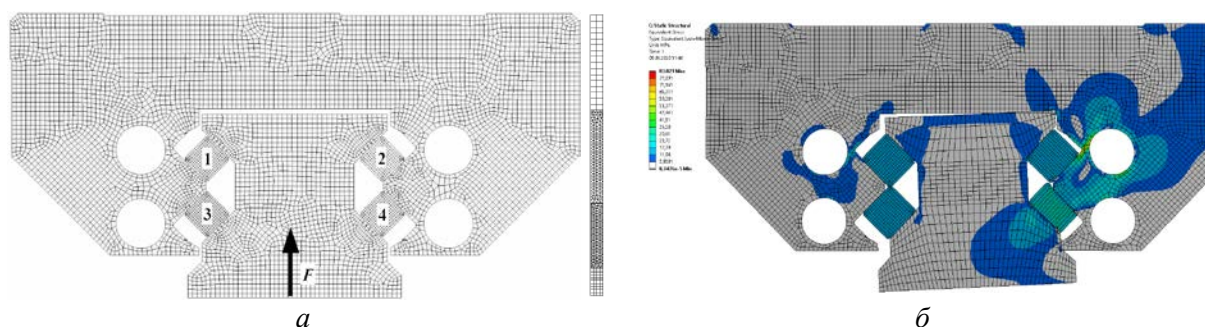


Рис. 1. МКЭ-модель направляющей качения

График зависимости расчетной жесткости направляющей (Н/мкм) от направления приложения нагрузки, град, представлен на рисунке 2. Расчетная жесткость при горизонтальном приложении силы $j_x = 473$ Н/мкм оказалась в 2,4 раза меньше, чем по данным каталога Rexroth ($j_x = 1143$ Н/мкм).

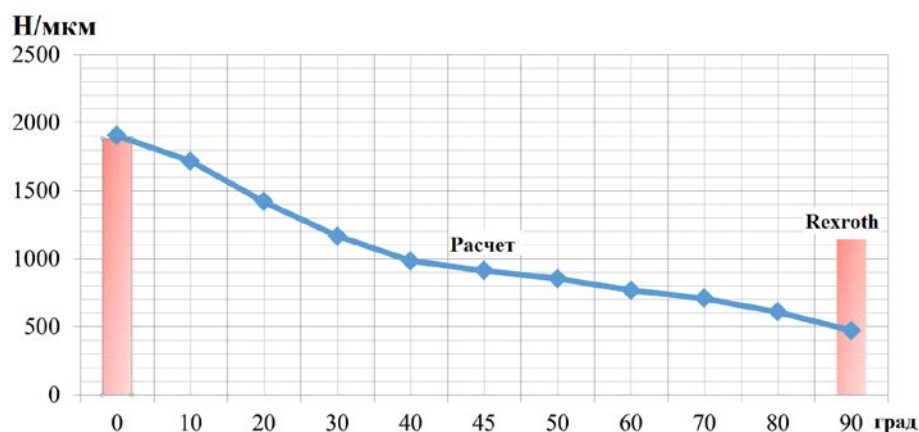


Рис. 2. Расчетная зависимость жесткости направляющей качения Rexroth от направления действия силы

Для выяснения причин такой кардинальной разницы сравнивались результаты МКЭ-расчетов для случая, когда сила прикладывается к нижней поверхности рельса (рис. 3, а), и когда сила прикладывается посередине между дорожек качения (рис. 3, б). В каталоге Rexroth величина такого смещения документирована и обозначается как $E_{9,2}$ (рис. 3, в). В случае приложения нагрузки симметрично относительно дорожек качения жесткость по результатам МКЭ-расчета практически точно совпадает с данными производителя (погрешность $\sim 5\%$).

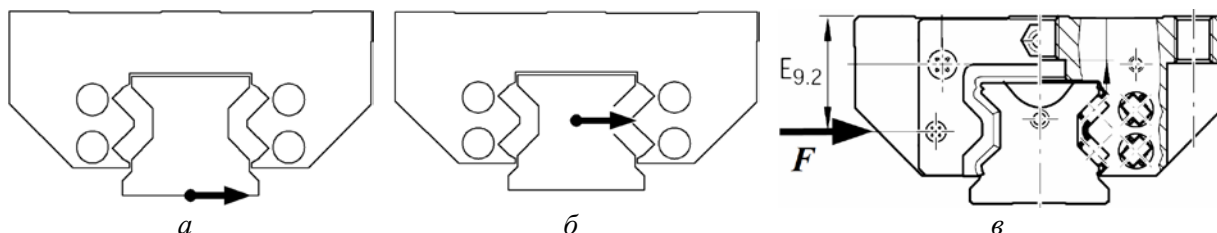


Рис. 3. Варианты нагружения направляющей боковой силой

Низкую жесткость при боковом нагружении подтверждают также и расчеты в фирменной программе LMD, содержащей встроенную базу данных по направляющим качения производства Rexroth [3]. Для того чтобы обеспечить совпадение жесткости в боковом направлении с данными каталога, нагрузку следует прикладывать ниже опорной поверхности кареток. Величина этого смещения в программе LMD описывается в поле «Height difference Δz between mounting surface RB and center of raceways».

В документации других производителей величина смещения для симметричного нагружения кареток отсутствует. При недостатке данных представляется допустимой принимать величину смещения равной расстоянию от опорной поверхности каретки до центра площадки между дорожками качения рельса.

Таким образом, фактическая жесткость направляющих Rexroth в боковом направлении существенно меньше приведенной в технической документации. Вероятно, это справедливо и для направляющих других производителей, построенных по той же самой конструктивной схеме (т.н. «схема О»). При конструировании технологического оборудования следует учитывать эту недокументированную особенность направляющих качения.

Оценим влияние направления действия нагрузки на долговечность (ресурс) направляющих. Очевидно, что нагрузка на различные тела качения направляющей в случае реального нагружения будет существенно различаться. На рис. 4 представлен график зависимости нагрузки на тела качения 1–4 как функция направления приложения нагрузки. Нагрузка на ролики представлена как отношение фактического натяга C_F к начальному (номинальному) натягу C_S . Этот параметр особенно удобен для анализа работы именно станочных направляющих. При работе станков недопустима ситуация типа «раскрытие стыка» (исчезновение натяга), в первую очередь, с точки зрения обеспечения точности обработки и устойчивости процесса резания (вибростойкости).

Результат МКЭ-расчета показывают, что по мере отклонения направления нагрузки от вертикальной оси для роликов 1 и 2 нагрузка практически одинакова и монотонно увеличивается от 0,46 до 1,15...1,21 C_F/C_S . При этом нагрузка на ролик 4 растет от 1,68 до 2,37 C_F/C_S . При увеличении угла нагрузки свыше 45° нагрузка на роликах 1–2, 4 начинает выравниваться благодаря податливости корпуса каретки.

Одновременно на ролик 3 натяг падает, причем нулевой натяг возникает уже при угле действия нагрузки порядка 70° . Следует отметить, что для роликовых направляющих режим работы без натяга недопустим, для шариковых – не рекомендуется. Исчезновение натяга может оказаться даже опасней перегрузки, поскольку полная разгрузка тел качения приводит к их проскальзыванию при движении и резкому ускорению износа. Поэтому весьма желательно не допускать чисто боковую нагрузку на направляющую, обеспечивая при работе гарантированный прижим каретки к рельсу (вертикальную компоненту нагрузки).

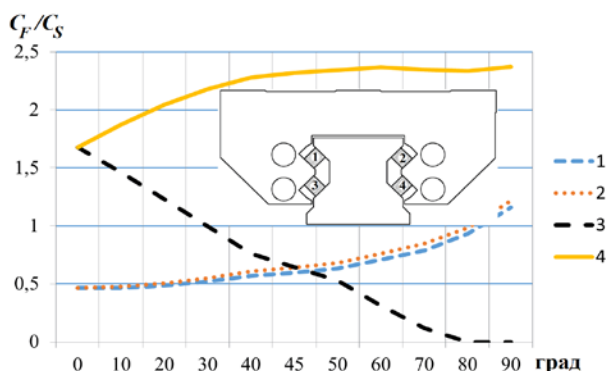


Рис. 4. Изменение нагрузки на ролики

Оценим влияние неравномерной нагрузки на ролики с точки зрения ресурса направляющих. Исходя из представлений Rexroth о характере распределения нагрузки между телами качения [2], при нагружении строго сверху-вниз (рис. 5, а) или справа-налево (рис. 5, б) соответствующие ряды тел качения нагружаются равномерно. С точки зрения Rexroth, нагрузка только на один ряд тел качения возможна только при приложении нагрузки под углом 45° (рис. 5, в).

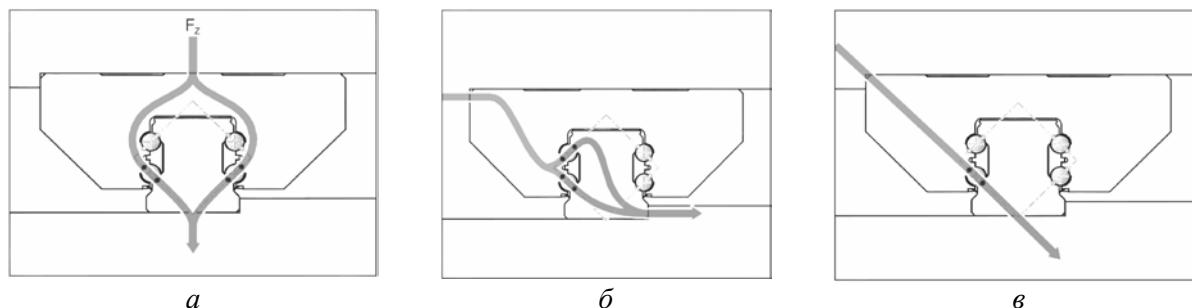


Рис. 5. Характер распределения нагрузки между телами качения

Исходя из этих соображений, и проводится расчет ресурса направляющих: Динамическая грузоподъемность C направляющих определяет их, который рассчитывается по формуле [4]:

$$L = \alpha_1 \left(\frac{C}{F} \right)^P L_0 \quad (1)$$

где L – расчетная долговечность (пробег) до появления первых признаков усталостного износа, км;

α_1 – вероятностный коэффициент долговечности;

C – номинальное значение динамической грузоподъемности;

F – эквивалентная нагрузка на каретку;

P – коэффициент; $P = 3$ для шариковых и $P = 10/3$ для роликовых направляющих;

L_0 – нормативный пробег, обычно принимаемый 50 километров для шариковых и 100 километров для роликовых направляющих.

Проведенное МКЭ-моделирование показало, что картина распределения нагрузок существенно отличается от идеализированного представления Rexroth. Один ряд тел качения перегружен даже при небольшом отклонении направления нагрузки от вертикали (на рисунке 4 это ряд № 4). Критический износ перегруженных тел и дорожек качения приводит к потере работоспособности направляющей в целом.

Оценим падения ресурса направляющей из-за изменения направления действия нагрузки. Принимая, что фактическая нагрузка на тела качения пропорциональна расчетной эквивалентной нагрузке F , можно записать:

$$\frac{L_{0-90}}{L} = \left(\frac{F_0}{F_{0-90} F_0} \right)^{10/3} \quad (2)$$

где L – расчетная долговечность, км, при нагрузке направленной сверху вниз;

L_{0-90} – расчетная долговечность, км, при нагрузке под углом;

F_0 – нагрузка в единицах CF/CS, приходящаяся на самый нагруженный ряд тел качения при нагрузке, направленной сверху вниз; $F_0 = 1,68CF/CS$;

F_{0-90} – нагрузка в единицах CF/CS, приходящаяся на самый нагруженный ряд тел качения при переменном направлении нагрузки.

Результаты расчета по зависимости (2) представлены на рис. 6. Ресурс направляющей падает в 2...3,17 раза при нагрузке, отклоняющейся от вертикали более чем на 20°.

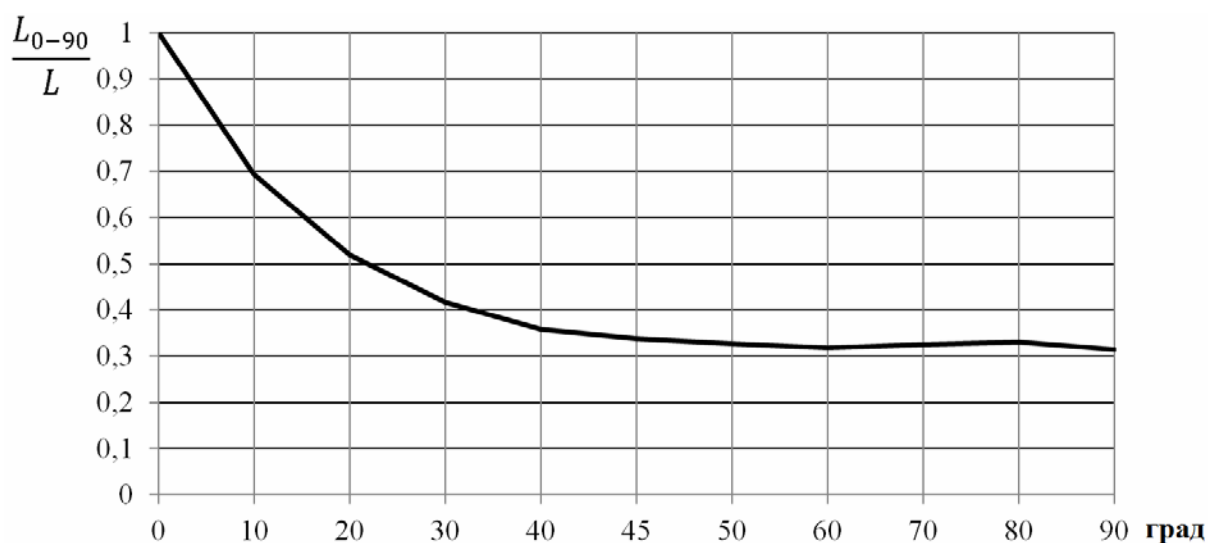


Рис. 6. Зависимость ресурса направляющей от направления действия нагрузки

Выводы. Движение рабочих органов современных многоосевых высокодинамичных станков происходит по сложным траекториям. В этих условиях оценить долю боковой нагрузки в общем цикле обработки еще на стадии проектирования достаточно затруднительно. Самый простой способ обеспечить заданные жесткость, и долговечность направляющей при произвольном направлении нагрузки – использовать следующий типоразмер направляющих. Например, направляющая с типоразмером 55 обеспечивает тот же ресурс при боковом направлении нагрузки, как и направляющая с типоразмером 45 при строго вертикальной нагрузке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bosch Rexroth AG. Roller Rail Systems. R999000354 (2015–10).
2. Bosch Rexroth AG. Linear Motion Technology Handbook. R310EN 2017 (2006.07).
3. Колесников, Л. А. Особенности выбора направляющих качения для металлорежущих станков / Л. А. Колесников, А. И. Кочергин // Справочник. Инженерный журнал. – 2018. – № 2. – С. 31–40.

Поступила 16.01.2020