

УДК 621.74+62-118+621.822.83

д.т.н. Сотников А. Л.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, 0713019870@mail.ru),
к.т.н. Ольшевский А. А.
(БГТУ, г. Брянск, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕХАНИЗМА КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Разрушение звеньев механизма качания кристаллизатора (МКК) в процессе эксплуатации машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является одной из причин нарушения работоспособности и безотказности механизма качания, т. е. способности обеспечивать заданные параметры колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ в течение требуемого периода времени. Оценка статической и динамической прочности (долговечности) звеньев МКК в широком диапазоне режимов работы позволила определить рациональные режимы работы из условия предупреждения их разрушения. Для рассмотренного варианта конструкции МКК сортовой МНЛЗ установлена рабочая частота колебательного движения кристаллизатора 200 кач./мин, что обеспечивает практически неограниченную долговечность его звеньев.

Ключевые слова: *конечно-элементная модель, механизм качания кристаллизатора, прочность, долговечность, напряженно-деформированное состояние, режимы работы.*

1 Введение

Среди современных сортовых МНЛЗ широкое распространение получили шарнирно-рычажные МКК (рис. 1) с электро-механическим приводом [1]. Данные механизмы качания преобразуют вращательное движение электродвигателя 1 через редуктор 2, эксцентриковую муфту 3 и рычажный механизм, состоящий из звеньев 14, 12, 10 и 7, в возвратно-вращательное движение кристаллизатора 8. С помощью электродвигателя регулируется частота колебательного движения кристаллизатора, а с помощью эксцентриковой муфты — амплитуда. Сдвоенный четырехзвенный шарнирно-рычажный механизм (звенья 14, 12, 10 и 7) обеспечивает колебательное движение кристаллизатора (вместе со столом качания 7) вдоль технологической оси ручья МНЛЗ.

Пневматические амортизаторы 9, установленные под столом качания 7 с противоположной стороны от привода МКК, предназначены для разгрузки от неуравновешенных сил (технологической нагрузки и сил инерции) шарниров рычажного механизма качания и уменьшения движущее-

го момента на эксцентриковом валу привода механизма.

К механизмам качания предъявляются повышенные требования по обеспечению заданных параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ, от чего зависит стабильность и безопасность технологического процесса разлива стали, качество получаемых заготовок, а также производительность и коэффициент использования МНЛЗ.

2 Актуальность и постановка задачи исследования

Актуальной задачей является снижение нагрузок шарнирно-рычажного МКК из условий снижения общей массы, уменьшения числа звеньев (узлов) и увеличения скорости вытягивания слитка из кристаллизатора с обеспечением заданной прочности и долговечности звеньев механизма качания.

В работе [2] выполнен анализ отказов и неисправностей МКК сортовых МНЛЗ Danieli и НКМЗ. Характерные разрушения эксцентрикового вала и деталей эксцентриковой муфты привода, а также износ

подшипников шарниров 5, 6, 11 и 13 (см. рис. 1) и их посадочных мест вызывают дополнительные движения звеньев МКК, оказывающие существенное влияние на разнообразные эксплуатационные характеристики механизма качания. В частности, снижается точность движения кристаллизатора относительно технологической оси ручья МНЛЗ, возникают ударные нагрузки в подшипниках, появляется горизонтальный ход и биения при движении стола качания 7 [2–5].

Для определения рациональных режимов работы МКК из условия предупреждения разрушения звеньев механизма качания необходимо выполнить оценку статической и динамической прочности (долговечности) звеньев в широком диапазоне режимов работы. Решение поставленной задачи заключается в разработке конечно-элементных моделей (КЭ-моделей) звеньев механизма качания (основание 4, верхний 10 и нижний 12 рычаги (коромысла), стол качания 7, шатун 14 и эксцентриковый вал 15) и исследовании их напряженно-деформированного состояния с помощью программного комплекса DSMFEM.

3 Разработка КЭ-моделей и моделирование напряженно-деформированного состояния

При оценке прочности каждое звено МКК рассматривалось отдельно. Для расчета при действии статических нагрузок исследуемый объект должен быть неподвижен в пространстве, поэтому вводились необходимые кинематические связи. Усилия взаимодействия звеньев между собой предварительно были определены в ходе динамического моделирования МКК, выполненного в работе [2]. Для всех звеньев МКК учитывались следующие нагрузки: собственный вес звеньев; силы инерции, связанные с вращением (центробежные силы) и ускорениями (как линейными, так и угловыми); усилия взаимодействия между звеньями; силы со стороны амортизаторов; нагрузка от сил взаимодействия кристаллизатора и непрерывнолитого слитка.

Размер КЭ-элемента выбирался согласно рекомендациям работы [6] — в 3...4 раза больше толщины листа исследуемой металлоконструкции.

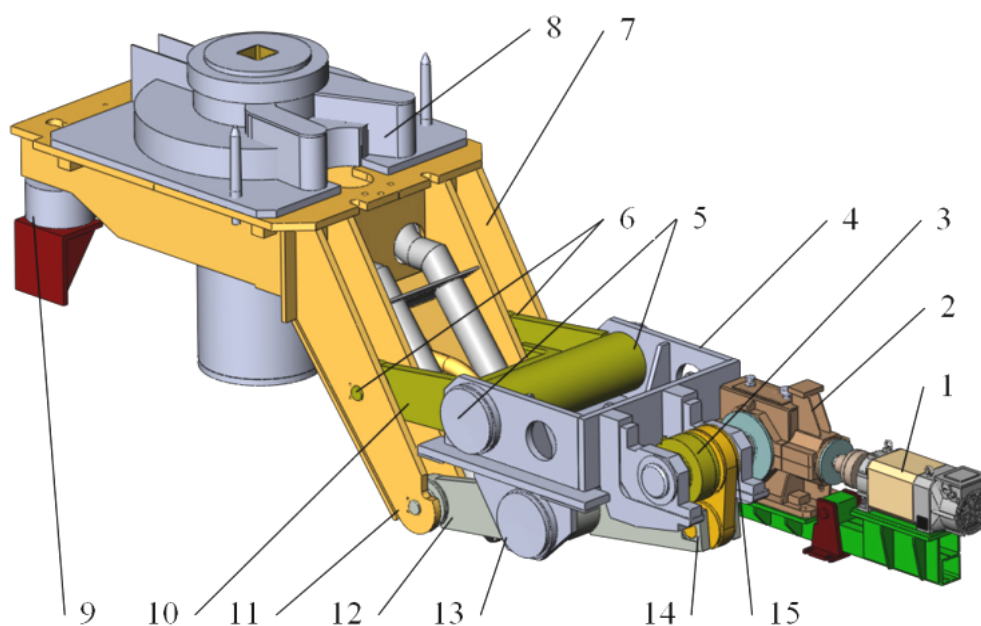


Рисунок 1 Общий вид МКК сортовой МНЛЗ

Для оценки прочности объекта расчета определяются эквивалентные напряжения, осредненные по всем КЭ, связанным с узлом модели. Для оценки долговечности дополнительно определяются все компоненты тензора напряжений и первые главные напряжения.

В ходе исследования расчет напряженно-деформированного состояния звеньев МКК выполнялся на одном цикле качания кристаллизатора МНЛЗ для номинальной и увеличенной частоты качания. Расчеты проводились для восьми положений МКК, через каждые 45° поворота эксцентрикового вала при частоте качания кристаллизатора 200 и 400 кач./мин. Кроме того, был выполнен расчет для положения, соответствующего максимальному значению нагрузок, приложенных к звену. Это положение определялось по результатам динамического моделирования МКК. Данное положение отличается для разных звеньев и меняется при изменении частоты качания кристаллизатора МНЛЗ.

Рассмотрим разработанную КЭ-модель и результаты моделирования на примере основания МКК. Основание представляет собой укрепленную ребрами жесткости «коробку» из толстых (40 мм) стальных листов, в стенках которой располагаются опоры подшипников рычагов. Со стороны привода МКК на кронштейнах устанавливаются опоры эксцентрикового вала привода. Основание МКК крепится на несущих металлоконструкциях в четырех местах болтовыми соединениями. Для моделирования опор подшипников введены стержневые элементы, распределяющие усилия от рычагов на поверхности отверстий под подшипники. Положение зоны для установки стержневых элементов принято в соответствии с основными усилиями со стороны рычагов механизма качания. Как показали расчеты, верхний рычаг при всех положениях в процессе работы МКК сжат, нижний рычаг растянут и с его стороны передаются довольно значительные вертикальные усилия. КЭ-модель ос-

нования (рис. 2) содержит более 55 тыс. элементов и около 28 тыс. узлов.

Основание МКК при работе неподвижно, поэтому силы инерции для него отсутствуют. Нагрузками служат силы, передаваемые верхним и нижним рычагами и опорами подшипников эксцентрикового вала. Схема нагрузок показана на рисунке 2, а (сила P_4 на рисунке не видна, сил P_5 две). Распределение напряжений в конструкции основания МКК и деформированное состояние приведено на рисунке 2, б (перемещения точек увеличены в 200 раз). Там же показаны расчетные зоны для анализа напряжений при различных положениях эксцентрикового вала и разных частотах качания кристаллизатора. Зависимости изменения максимальных напряжений в расчетных зонах от частоты приведены на рисунке 2, в.

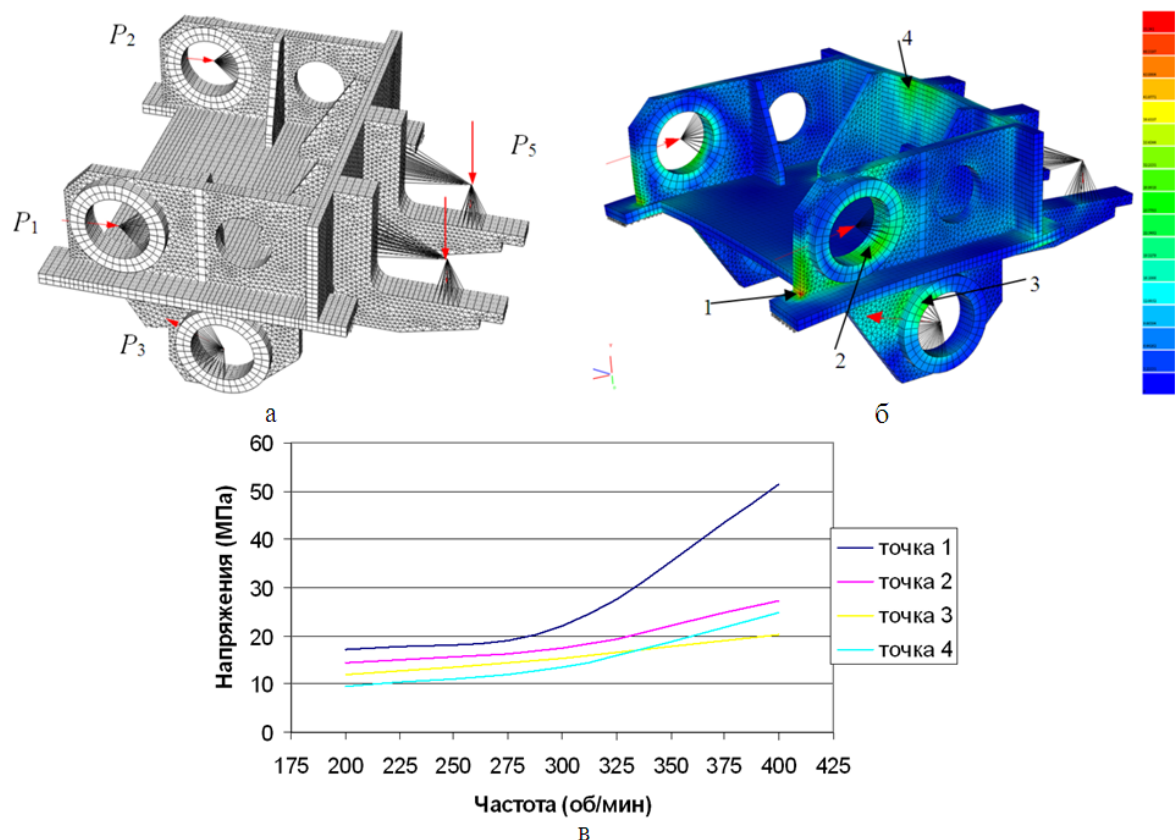
Аналогичным образом разработаны КЭ-модели и выполнены исследования верхнего и нижнего рычагов (коромысел), стола качания и шатуна (рис. 3).

4 Оценка прочности звеньев механизма качания кристаллизатора

Допускаемые напряжения материала, из которого изготовлены звенья МКК, определяются по пределу текучести с необходимым запасом прочности. Используемые в звеньях МКК толщины листов (от 10 до 40 мм) характерны для многих отраслей машиностроения, в том числе для металлургических и подъемно-транспортных машин. Поэтому для выбора допускаемых напряжений были использованы нормы, применяемые в краностроении и литейном производстве [6].

Такие звенья МКК, как основание, верхний и нижний рычаги и стол качания, изготовлены из стали ст3 (разных модификаций) по ГОСТ 14637–89. Предел текучести для листов толщиной до 40 мм, изготовленных из этой стали, составляет не ниже 240 МПа, а предел прочности — не менее 380 МПа.

Шатун МКК изготовлен из стали 45 ГОСТ 1577–93. Предел текучести этой стали в зависимости от термообработки равен 315...570 МПа.



а — схема действующих нагрузок; б — расчетные зоны и распределение эквивалентных напряжений (максимальные напряжения — 51,5 МПа); в — зависимость максимальных напряжений в расчетных зонах от частоты качания кристаллизатора

Рисунок 2 КЭ-модель основания МКК

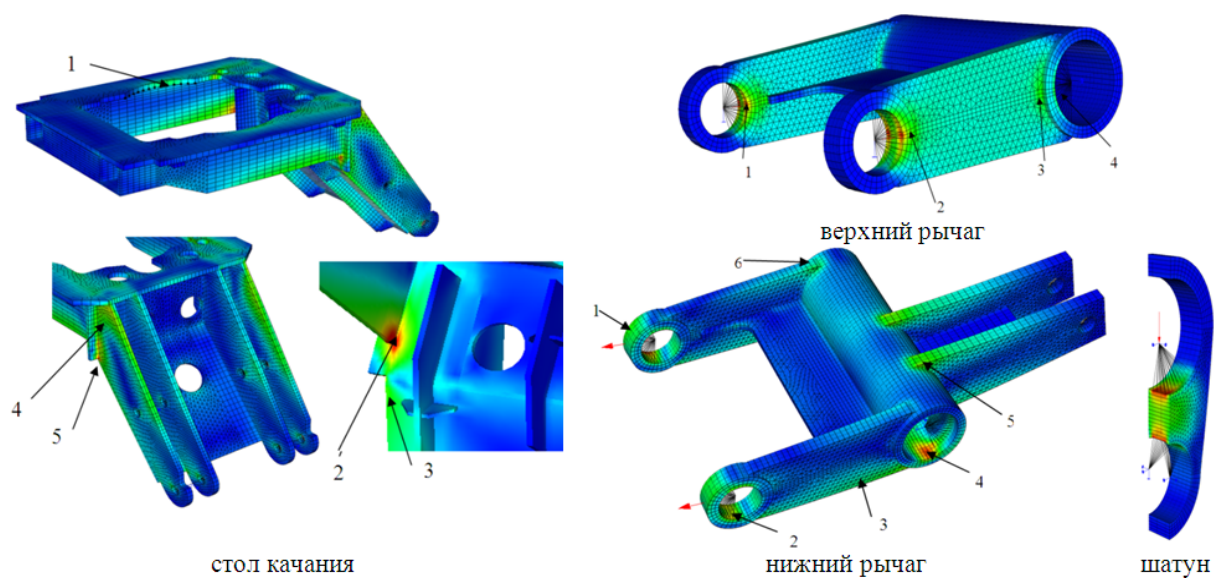


Рисунок 3 Расчетные зоны и распределение эквивалентных напряжений в звеньях МКК

Результаты выполненных расчетов показали, что во всех звеньях МКК, а именно в основании, верхнем и нижнем рычагах, столе качания и шатуне, напряжения значительно возрастают при увеличении частоты качания кристаллизатора, при этом на всех частотах они остаются значительно ниже допускаемых по условию статической прочности. Для примера, сопоставление максимальных расчетных напряжений с допускаемыми на повышенной частоте качания кристаллизатора приведено в таблице 1.

Полученные результаты оценки прочности звеньев МКК являются основой для расчета их долговечности. При действии нагрузок, изменяющихся во времени, разрушение конструкций звеньев МКК может происходить при нагрузках в несколько раз меньших, чем при статическом нагружении. Наличие концентраторов напряжений в виде отверстий, сварных швов, резкого изменения формы и т. п. значительно снижает уровень напряжений, при которых обеспечивается работа звеньев в течение заданного периода времени. Поэтому оценка статической прочности, является важным, но недостаточным этапом оценки надежности конструкций звеньев МКК.

5 Оценка долговечности звеньев механизма качания кристаллизатора

Порядок расчета долговечности звеньев МКК был принят следующим.

1. *Выбор расчетной зоны.* Расчет на долговечность выполняется для конкретной зоны конструкции каждого звена исследуемого МКК, потенциально наиболее опасной с точки зрения возникновения усталостного разрушения. Расчетными зонами следует считать такие места конструкции, в которых сочетаются достаточно большие изменения напряжений во время работы и существенная концентрация напряжений, обусловленная резкими изменениями формы (сварными швами, вырезами, отверстиями, напрессованными деталями, подвижным контактом и пр.).

Выбор зоны проводится на основе анализа картины распределения напряжений (желательно в виде сетки изолиний, цвета и пр.), поэтому его целесообразно выполнять на основе анализа результатов расчета конструкций с помощью МКЭ. Расчетных зон может быть несколько.

2. *Определение усталостных характеристик расчетной зоны.* Усталостной характеристикой расчетной зоны являются пределы выносливости по нормальным или касательным напряжениям, а также показатели наклона усталостной кривой. Для определения пределов выносливости необходимо подобрать тип базового концентратора, соответствующий конструкции рассчитываемого узла в расчетной зоне. При наличии двух и более концентраторов в расчетной зоне расчет нужно вести с учетом каждого из них, что в принципе вызывает серьезные затруднения.

3. *Моделирование процесса нагружения расчетной зоны.* Процесс нагружения расчетной зоны характеризует график изменения напряжений, возникающих при работе объекта расчета. Реальное нагружение может представлять собой весьма сложный случайный процесс, который должен быть заменен для расчета на долговечность некоторыми детерминированными оценками, которые основаны на нормативных оценках параметров режима нагружения. Одним из способов его получения является квазистатический метод последовательного расчета конструкции на различные комбинации нагрузок, характеризующих реальное нагружение. В зависимости от условий, при анализе работы объекта расчета может быть выбран один или несколько характерных технологических циклов, для каждого из которых необходимо построить график изменения напряжений. При наличии нескольких характерных технологических циклов для них вводят весовой коэффициент, учитывающий частоту его появления в реальных условиях.

Таблица 1

Сопоставление максимальных расчетных напряжений с допускаемыми на частоте качания кристаллизатора 400 кач./мин

Звено МКК	Марка стали	Напряжение, МПа		Коэффициент запаса прочности
		максимальное	допускаемое	
Основание	ст3	47,7	160	3,4
Верхний рычаг	ст3	46,8	160	3,4
Нижний рычаг	ст3	20,1	160	8,0
Стол качания	ст3	82,1	160	1,95
Шатун	сталь 45	23,2	210	9,05

4. *Анализ процесса нагружения.* Реальный процесс нагружения, как правило, нестационарный, а усталостные характеристики и условия сопротивления усталости приводятся для стационарного нагружения. Поэтому графики нестационарных процессов расчетной зоны необходимо заменить эквивалентными по создаваемому усталостному повреждению. Для этого необходимо процесс схематизировать (то есть разложить на элементарные отдельные циклы), привести все циклы к единому коэффициенту асимметрии и определить параметры эквивалентного стационарного нагружения.

5. *Проверка сопротивления усталости.* Расчет на сопротивление усталости может иметь различные формы. Частным случаем проверки по напряжениям является проверка на неограниченную долговечность. Проверка по долговечности — сравнение числа циклов до разрушения с установленным ресурсом. Проверка по повреждениям — сравнивается расчетное накопленное повреждение с предельным значением.

Для расчета на долговечность необходимо отнести расчетную зону к одной из групп узлов по уровням пределов выносливости. Группа определяется по характерному виду основного концентратора напряжений, например, высверленное отверстие, стыковой сварной шов, приваренная косынка и т. д. Примером такой таблицы является таблица 5.3.2 в работе [6]. В зависимости от свойств стали (определяющим является предел прочности стали)

и выбранной группы по уровню предела выносливости определяется значение базового предела выносливости узла σ_{-1KB} для листа толщиной $t_0=20$ мм. Затем вычисляется предел выносливости сварного узла по формуле

$$\sigma_{-1K} = k_t \sigma_{-1KB},$$

где $k_t = (t_0/t)^{0,2}$ — коэффициент, учитывающий толщину листа; t — толщина листа звена исследуемого механизма, в котором возможно возникновение трещины.

Предел неограниченной выносливости, максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором усталостное разрушение не возникает при сколь угодно большом числе циклов [6], определяется по формуле

$$\sigma_{RK} = \frac{2\sigma_{-1K}}{1 - R + (1 + R)\psi_K},$$

где $\psi_K = \frac{0,57\sigma_{-1K}}{\sigma_e}$ — коэффициент

чувствительности к асимметрии цикла;

$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ — коэффициент асимметрии

цикла как отношение минимальных σ_{\min} и максимальных σ_{\max} напряжений цикла нагружения.

Условие долговечности объекта расчета записывается в виде

$$N \leq N_0 \left(\frac{\sigma_{-1K}}{K_{зан} k_\alpha \sigma_{ef}} \right)^m,$$

где N — число циклов работы объекта расчета; m — показатель степени кривой усталости

$$m = \frac{3,3}{\lg \sigma_{\sigma} - \lg \sigma_{RK}};$$

σ_{σ} — временное сопротивление стали; $N_0 = 2000000$ — базовое число циклов; k_a — коэффициент концентрации, при расчетах МКЭ можно принимать $k_a = 1$; σ_{ef} — приведенное напряжение

$$\sigma_{ef} = \sigma_{-1K} \left[\frac{\sigma_{\max}}{\gamma'_d \sigma_{RK}} \right]^v,$$

где v — показатель степени, вычисляемый по формуле

$$v = \frac{\lg \sigma_{\sigma} - \lg \sigma_{-1K}}{\lg \sigma_{\sigma} - \lg \sigma_{RK}};$$

γ'_d — коэффициент, учитывающий снижение предела выносливости, возникающее в результате изменения коэффициента асимметрии цикла при непропорциональном возрастании переменной и постоянной составляющих цикла нагружения [6]

$$\gamma'_d = \begin{cases} 1 - 0,15 R, & \text{если } R > 0; \\ 1, & \text{если } R \leq 0. \end{cases}$$

Для низкоуглеродистых сталей иногда считают, что если изделие выдержало 5000000 циклов, то его долговечность не ограничена. При высоких коэффициентах концентрации напряжений и для легированных сталей это предположение, как правило, не выполняется.

Для расчета на долговечность используют нормальные, перпендикулярные оси сварного шва, эквивалентные или первые главные напряжения. В тех случаях, когда можно установить основной компонент напряжений, расчет выполняют по нормальным напряжениям, при явно выраженном двухосном напряженном состоянии ведут отдельный расчет по нормальным и касательным напряжениям, с определением эквивалентного числа циклов.

Например, при расчете основания МКК на статическую прочность наибольшие напряжения были выявлены в зоне 1 (см. рис. 2, б). Максимальные эквивалентные напряжения в этой зоне составляют 51,5 МПа, минимальные — 1,2 МПа. Как показал анализ, наиболее важным компонентом напряжений в зоне являются нормальные напряжения σ_z , распределение которых показано на рисунке 4, а. Максимальные напряжения равны $\sigma_{\max} = 55,3$ МПа, минимальные — $\sigma_{\min} = 13,6$ МПа.

В расчетной зоне основания МКК толщина листа составляет $t = 30$ мм, есть сварной тавровый шов. В соответствии с таблицей 5.3.2 [6], расчетную зону при качественной контролируемой сварке можно отнести к 6-й группе узлов. Временное сопротивление стали $\sigma_{\sigma} = 380$ МПа. Базовый предел выносливости равен $\sigma_{-1KB} = 52$ МПа. В соответствии с вышеизложенной методикой получим

$$k_t = \left(\frac{20}{30} \right)^{0,2} = 0,922,$$

$$\sigma_{-1K} = k_t \sigma_{-1KB} = 0,922 \cdot 52 = 47,95 \text{ МПа.}$$

Блок нагружения характеризуется значениями σ_{\max} и σ_{\min} , тогда коэффициент асимметрии равен

$$R = \frac{-13,6}{55,3} = -0,246.$$

Коэффициент чувствительности к асимметрии цикла:

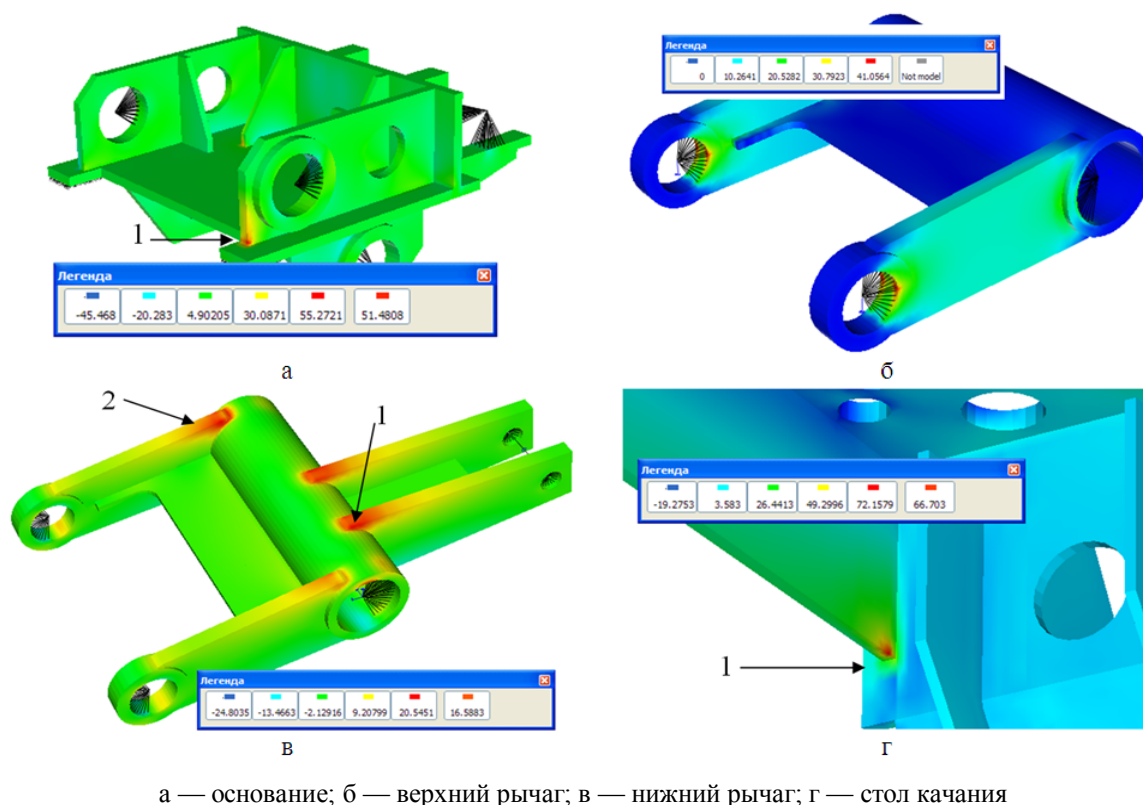
$$\psi_K = \frac{0,57 \cdot 47,95}{380} = 0,072,$$

тогда:

$$\sigma_{RK} = \frac{2 \cdot 47,95}{1 + 0,246 + (1 - 0,246) \cdot 0,072} = 73,75 \text{ МПа,}$$

$$m = \frac{3,3}{\lg 380 - \lg 73,75} = 2,01,$$

$$v = \frac{\lg 380 - \lg 47,95}{\lg 380 - \lg 73,75} = 1,26.$$



а — основание; б — верхний рычаг; в — нижний рычаг; г — стол качания

Рисунок 4 Распределение напряжений σ_x и положение расчетных зон звеньев МКК

Приведенные к симметричному циклу напряжения при нагружении основания МКК равны

$$\sigma_{ef} = 47,95 \left[\frac{55,3}{1 \cdot 73,75} \right]^{1,26} = 33,36 \text{ МПа.}$$

Расчетное число циклов нагружения рассматриваемой зоны основания МКК до появления трещины составит

$$N = 2000000 \left(\frac{47,95}{1,5 \cdot 1 \cdot 33,36} \right)^{2,01} = 1836000 \text{ цик.}$$

При частоте качания кристаллизатора 400 кач./мин полученное число циклов соответствует всего трем дням работы, чего явно недостаточно. При частоте 300 кач./мин максимальные напряжения составляют 22,3 МПа, минимальные — 7 МПа. Расчетное число циклов равно 107 миллионов, или 185 суток работы. При частоте 200 кач./мин соответственно 17 и 4 МПа и 1150 суток работы.

Следует отметить, что напряжения в этой зоне основания МКК существенно зависят от условий его крепления на металлоконструкциях МКК. Рекомендации [6] также явно указывают, что при использовании для расчета напряженно-деформированного состояния объемных КЭ малого размера (меньше толщины листов) расчетная долговечность оказывается существенно заниженной, поэтому полученные результаты не являются абсолютными. В то же время характер распределения напряжений указывает на явный концентратор на краю вертикального листа конструкции основания. Таким образом, рекомендуется конструкцию основания МКК изменить, сделав плавный переход в рассмотренной опасной зоне.

Расчетная зона **верхнего рычага МКК** (рис. 4, б) — зона приварки ребра к опоре (тавровый шов с двусторонней разделкой кромок). Узел можно отнести к 6-й группе, когда временное сопротивление

стали составляет 380 МПа. Базовый предел выносливости равен 52 МПа. В этой зоне всегда действуют сжимающие напряжения, при этом минимальные напряжения практически равны нулю. При частоте качания кристаллизатора 400 кач./мин максимальные нормальные напряжения в расчетной зоне равны 20,2 МПа. Тогда, аналогично расчету основания МКК, расчетное число циклов до появления трещины в конструкции верхнего рычага будет равно $904 \cdot 10^6$, что соответствует работе в течение 4 лет. При частоте качания 300 и 200 кач./мин долговечность верхнего рычага МКК можно считать неограниченной.

Расчетные зоны **нижнего рычага** (рис. 4, в) — зоны приварки ребра к опоре (тавровый шов с двусторонней разделкой кромок) и посадочные места подшипников, в которых действуют высокие напряжения от изгиба и есть концентраторы напряжений в виде отверстий под крепление крышек подшипниковых узлов. Напряжения в расчетной зоне знакопеременные. Результаты расчета долговечности для нижнего рычага приведены в таблице 2 и показывают, что при частоте качания кристаллизатора 200 кач./мин долговечность рычага не ограничена; при частоте 300 кач./мин возможно появление трещин после 1,5 года работы, а

при частоте 400 кач./мин появление трещин вероятно уже в первые месяцы работы. В **столе качания** (рис. 4, г) высокие напряжения были выявлены в зоне приварки ребер к стойке. Наибольшую роль играют нормальные напряжения σ_x . Результаты расчета долговечности для стола качания приведены в таблице 2. Конструкция основания содержит явный концентратор напряжений, долговечность при повышенных частотах качания кристаллизатора недостаточна. Таким образом, конструкцию стола качания МКК желательно усилить, обеспечив плавный переход от ребра к стойке.

Основной компонент нормальных напряжений в **шатуне МКК** — напряжения σ_z . Шатун не имеет сварных швов, основным концентратором являются отверстия для крепления крышек подшипниковых узлов, причем эти отверстия не попадают в зону наибольших напряжений. Расчетная зона может быть отнесена к 4-й зоне с пределом выносливости 75 МПа. Максимальные напряжения при растяжении шатуна не превышают 23 МПа, а при сжатии в этой зоне напряжения практически равны нулю, таким образом, долговечность шатуна не ограничена во всем рассматриваемом диапазоне частот качания кристаллизатора МКК.

Таблица 2

Расчет долговечности звеньев МКК

Частота качания, мин ⁻¹	Расчетная зона (рис. 4)	Толщина листа, t, мм	σ_{-1KB} , МПа	Расчетные напряжения, МПа		Расчетное число циклов, $N \cdot 10^{-6}$	Срок службы ¹ , дней
				σ_{max}	σ_{min}		
Нижний рычаг							
400	1	40	52	23	-24	10,3	18
	2	40	52	24	-21	12,5	22
300	1	40	52	15	-7	226	523
	2	40	52	16	-7	212	490
200	1	40	52	9	-8	∞	—
	2	40	52	9	-8	∞	—
Стол качания							
400	1	30	52	62	12	13	23
300				48	16	306	708
200				43	21	∞	—

¹Срок службы до появления трещины в данной зоне.

6 Заключение

1. Выполнены расчеты звеньев МКК на действие нагрузок, возникающих при работе на частотах качания кристаллизатора МНЛЗ от 200 до 400 кач./мин, с учетом в качестве нагрузок усилий в шарнирах, сил инерций, собственного веса звеньев, а также усилия взаимодействия непрерывного слитка с кристаллизатором.

2. Оценка прочности звеньев механизма качания по напряжениям, возникающим при их работе, свидетельствует о том, что максимальные напряжения в его звеньях возрастают (1,5...3 раза) при увеличении частоты качания кристаллизатора с 200 до 400 кач./мин. Однако при любых рассмотренных частотах качания остаются значительно ниже допускаемых напряжений по условию статической прочности (коэффициент запаса прочности составляет от 3,4 до 23,3). Расчеты показывают, что, исходя из критериев прочности, масса звеньев МКК может быть существенно снижена,

например, за счет уменьшения толщины листов (с 40 до 30 мм) металлоконструкций звеньев. Это может благоприятно сказаться на работе МКК за счет снижения инерционных нагрузок (на 10...20%), однако при этом необходимо учитывать влияние уменьшения жесткости на кинематические характеристики и резонансные явления МКК, возникающие при его работе.

3. Выполненный расчет долговечности звеньев МКК показывает, что для большинства звеньев расчетная долговечность достаточно велика. При частоте качания кристаллизатора 200 кач./мин для всех расчетных зон обеспечивается практически неограниченная долговечность. При повышенных частотах качания недостаточная долговечность ожидается в основании и столе качания МКК, где наблюдаются явные зоны концентрации напряжений. Их конструкцию целесообразно изменить для снижения концентрации напряжений в выделенных зонах.

Библиографический список

1. Состояние непрерывной разливки стали на сортовых МНЛЗ в Украине и Молдове [Текст] / А. Л. Сотников и др. // *Сталь*. — 2013. — № 12. — С. 8–13.
2. Сотников, А. Л. Предупреждение отклонений параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ на основе развития методов диагностики механизма качания: дис. ... канд. техн. наук / А. Л. Сотников ; Дон. нац. техн. ун-т. — Донецк, 2008. — 206 с.
3. Failure analysis of the hinge-lever mould oscillator bearings of the continuous casting machine [Text] / O. Sotnikov, M. Rodionov, P. Maruschak and other // *Strength, Fracture and Complexity*. — 2014. — Issue 8. — P. 135–143.
4. Scale levels of damage to the raceway of a spherical roller bearing [Text] / P. O. Maruschak, S. V. Panin, I. M. Zakiev and other / *Engineering Failure Analysis*. — 2016. — Vol. 59. — P. 69–78.
5. Сотников, А. Л. Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ [Текст] / А. Л. Сотников // *Известия вузов. Черная металлургия*. — 2016. — Т. 59. — № 5. — С. 334–338.
6. Соколов, С. А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин [Текст] / С. А. Соколов. — СПб. : Политехника, 2005. — 423 с.

© Сотников А. Л.

© Ольшевский А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. ОМД ДонНТУ Снитко С. А.

Статья поступила в редакцию 05.11.2020.

**Doctor of Technical Sciences Sotnikov A. L. (DonNTU, Donetsk, DPR), PhD in Engineering
Olshevskiy A. A. (BSTU, Bryansk, Russia)**

**STUDY OF STRENGTH AND DURABILITY OF MOLD OSCILLATING SYSTEM IN
CONTINUOUS CASTING MACHINE AT DIFFERENT OPERATING MODES**

Breaking the links of mold oscillating system (MOS) during operation of the continuous casting machine (CCM) is one of the reasons for the failure of oscillating system, i. e. the ability to provide the specified parameters of oscillatory motion of the CCM mold for the required period of time. Assessment of static and dynamic strength (durability) of MOS links in a wide range of operating modes allowed to determine rational operating modes based on the condition of preventing their breaking. For the considered design version of the MOS grade CCM, the operating frequency of mold oscillatory motion is set at 200 osc/min, provide practically unlimited durability of its links.

Key words: *finite-element model, mold oscillating system, strength, durability, stress-strain state, operating modes.*