

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ

Разрушение вала ротора электродвигателя привода нижнего рабочего валка обжимной прокатной клетки на одном из предприятий привело к внеплановой остановке стана. Вал работал в течение 30 лет. Установить причины разрушения вала необходимо для предупреждения подобных ситуаций. Целью статьи является выявление факторов, обуславливающих напряжённо-деформированное состояние вала двигателя, и оценка степени их влияния с помощью математического моделирования.

Рассматриваемая прокатная клетка является двухвалковой, с индивидуальным приводом рабочих валков. Вращение каждому валку передается от электродвигателя П-23А/71-1,8-2,7 через шпиндельное устройство, в приводе нижнего валка присутствует также промежуточный вал (рис. 1). Основные характеристики двигателя: номинальная мощность – 2×2700 кВт; номинальная частота вращения – 60 об/мин; номинальный момент двигателя – 860 кНм; максимальный момент двигателя – 2322 кНм; момент инерции роторов – $67,5 \text{ кгм}^2$.

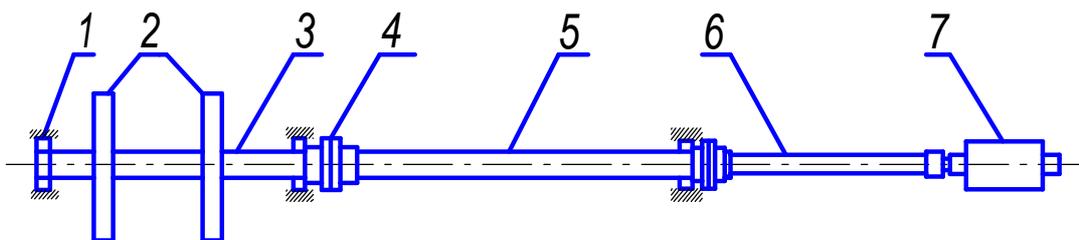


Рис. 1. Схема привода нижнего рабочего валка:

1 – опора; 2 – ротор; 3 – вал двигателя; 4 – соединительная муфта; 5 – промежуточный вал; 6 – универсальный шпиндель; 7 – рабочий валок.

Поломка заключалась в полном разрушении вала двигателя 3 под соединительной муфтой 4 (рис. 2). Вал представляет собой цилиндрическую деталь со сквозным отверстием, наружный диаметр вала – 750 мм, диаметр отверстия – 400 мм; натяг в месте установки на вал полумуфты составляет 0,892 мм. Материал вала – сталь 30ГСЛ.

Напряжённо-деформированное состояние вала определяют: напряжения, возникающие в процессе работы вала, от технологической нагрузки; напряжения от напрессовки полумуфты на вал; напряжения от несоосности вала двигателя с промежуточным валом; возможные резонансы системы при возникновении механических колебаний [1].

Проведено математическое моделирование напряжённого состояния вала в специализированном пакете компьютерного моделирования – ANSYS, основанного на методе конечных элементов [2]. Такой подход позволил провести исследование напряжённого состояния приводной линии, качественно и количественно оценить возможные места возникновения и развития повреждений деталей. Определены частоты и моды собственных колебаний системы. Для проведения моделирования создана конечно-элементная модель приводной линии (рис. 3) и заданы свойства материала деталей системы.



Рис. 2. Структура поверхности излома вала

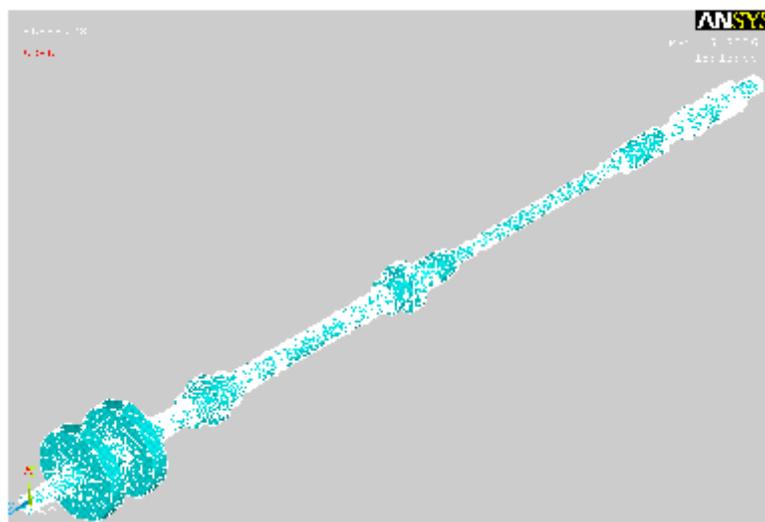


Рис. 3. Конечно-элементная модель вала

В качестве технологической нагрузки принят максимальный крутящий момент, равный 2322 кНм. Исследование напряжений и деформаций под действием технологической нагрузки показало, что наиболее нагруженной частью приводной линии является вал двигателя. Максимальные эквивалентные напряжения составили 43 МПа. Картина распределения напряжений по валу представлена на рис. 4.

Непосредственно в месте излома вала величина напряжений составляет 10...20 МПа. В данном месте напрессована полумуфта - это снижает предел выносливости вала.

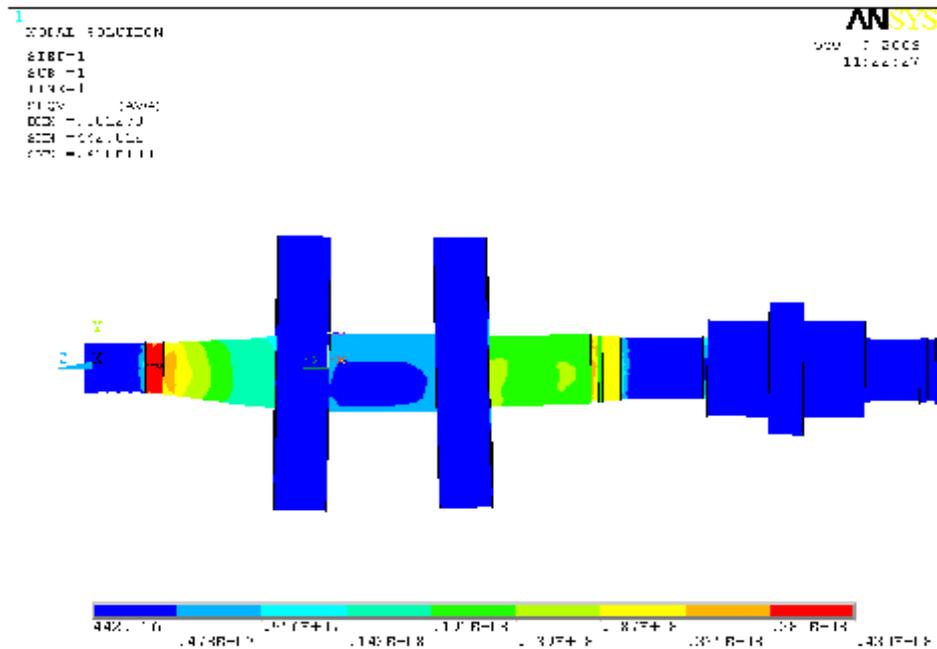


Рис. 4. Распределение напряжений на валу электродвигателя от технологической нагрузки

При моделировании несоосности валов в качестве условий нагружения выступают варианты несоосностей вала ротора электродвигателя и промежуточного вала. Рассмотрены случаи смещения оси промежуточного вала. Направления смещения - по осям X и Y влево и вправо, вверх и вниз, а также одновременно по двум возможным направлениям. Величины смещения таковы: 0,1; 0,5; 1 мм. На рис. 5 представлена картина напряжённо-деформированного состояния системы при смещении промежуточного вала на 0,1 мм вниз по оси Y.

Наибольшие напряжения возникают в месте перехода подшипниковой опоры к посадочному участку полумуфты и составляют 46,7 МПа.

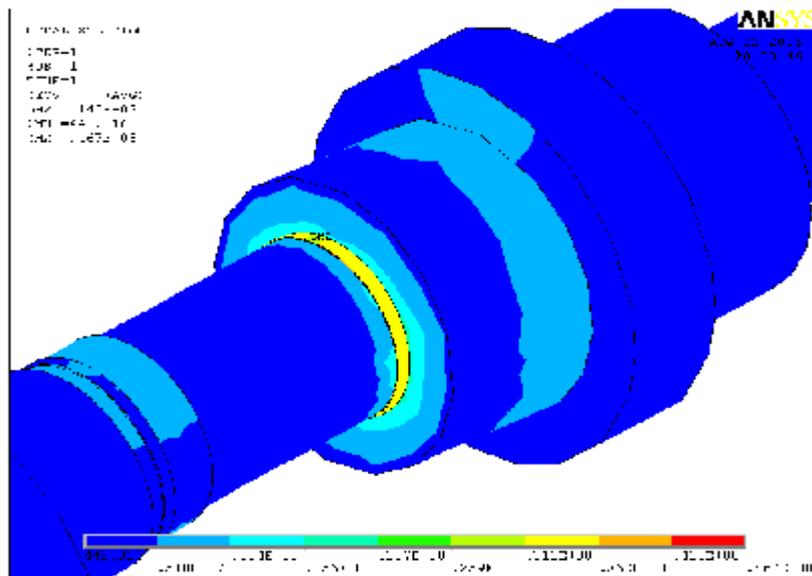


Рис. 5. Напряжённо-деформированное состояние при смещении промежуточного вала на 0,1 мм вниз

На рис. 6 представлена картина распределения напряжений по продольному сечению опасного участка вала двигателя при смещении промежуточного вала на 0,5 мм вниз.

Наибольшие напряжения возникают в месте перехода подшипниковой опоры к посадочному участку полумуфты и составляют 232 МПа.

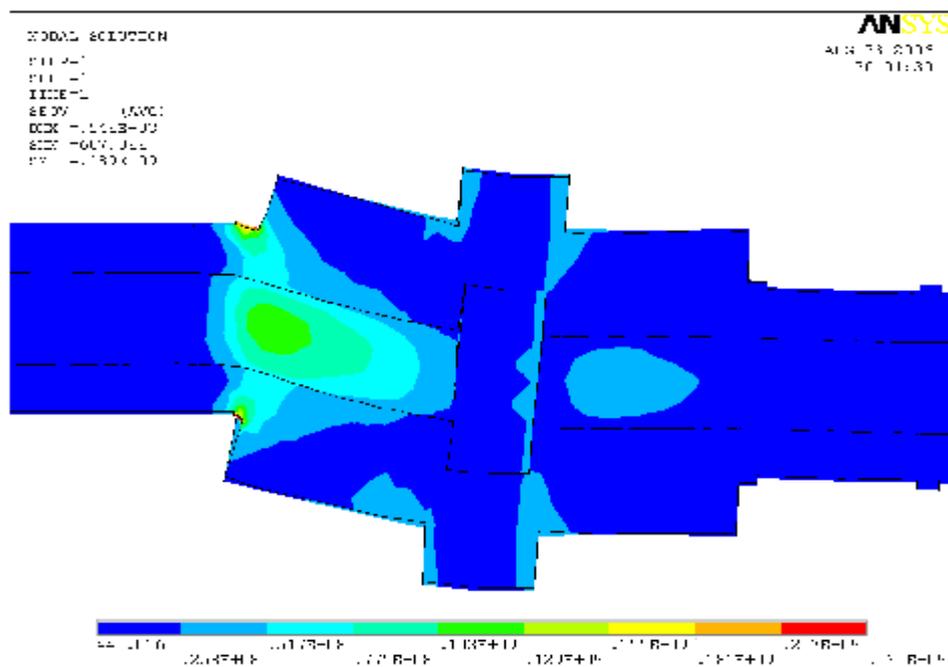


Рис. 6. Распределение напряжений внутри вала двигателя

При возникновении несоосности валов по оси Y при смещении промежуточного вала на 1 мм картина распределения напряжений в теле вала ротора электродвигателя показана на рис. 7.

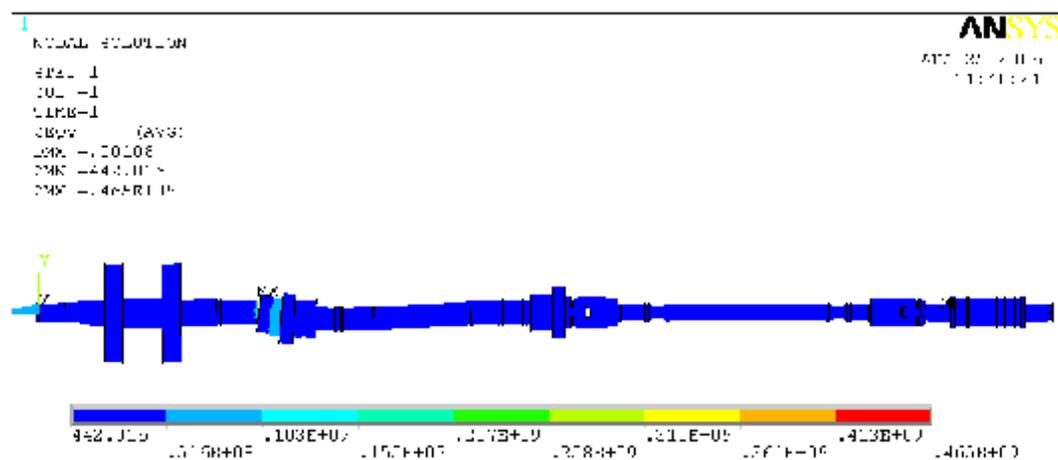


Рис. 7. Напряжённо-деформированное состояние системы при смещении промежуточного вала на 1 мм вниз

Наибольшие напряжения составляют 465 МПа в месте перехода подшипниковой опоры к посадочному участку полумуфты.

При несовпадении осей валов в радиальном направлении в интервале 0,05...0,1 мм в теле вала двигателя возникнут дополнительные напряжения, суммарная величина которых вместе с напряжениями от технологической нагрузки и напрессовки полумуфта будет способствовать зарождению и развитию усталостных трещин. Если несоосность валов составит 0,1...0,5 мм, то напряжения на валу двигателя будут сравнимы с пределом текучести материала вала (сталь 30ГСЛ), который составляет 350 МПа. В случае возникновения несоосности валов 0,5...1,0 мм напряжения достигнут предела прочности стали и произойдет разрушение вала ротора электродвигателя.

На рис. 8 представлен график зависимости напряжений, возникающих в теле вала ротора, от величины несоосности с промежуточным валом.

Исследование напряжений в соединении «вал – полумуфта», возникающих от напрессовки полумуфты на вал, показало, что при таком способе передачи крутящего момента от вала двигателя к промежуточному валу имеет место значительное повышение напряжений в месте излома вала. Наличие напрессованной полумуфты резко снижает сопротивление усталости вала и способствует зарождению усталостных трещин на поверхности контакта сопрягаемых деталей. Эквивалентные напряжения в теле вала от наличия прессового соединения, полученные аналитическим путём, равны 233 МПа, а предел выносливости материала вала может снизиться почти в 3,5 раза.

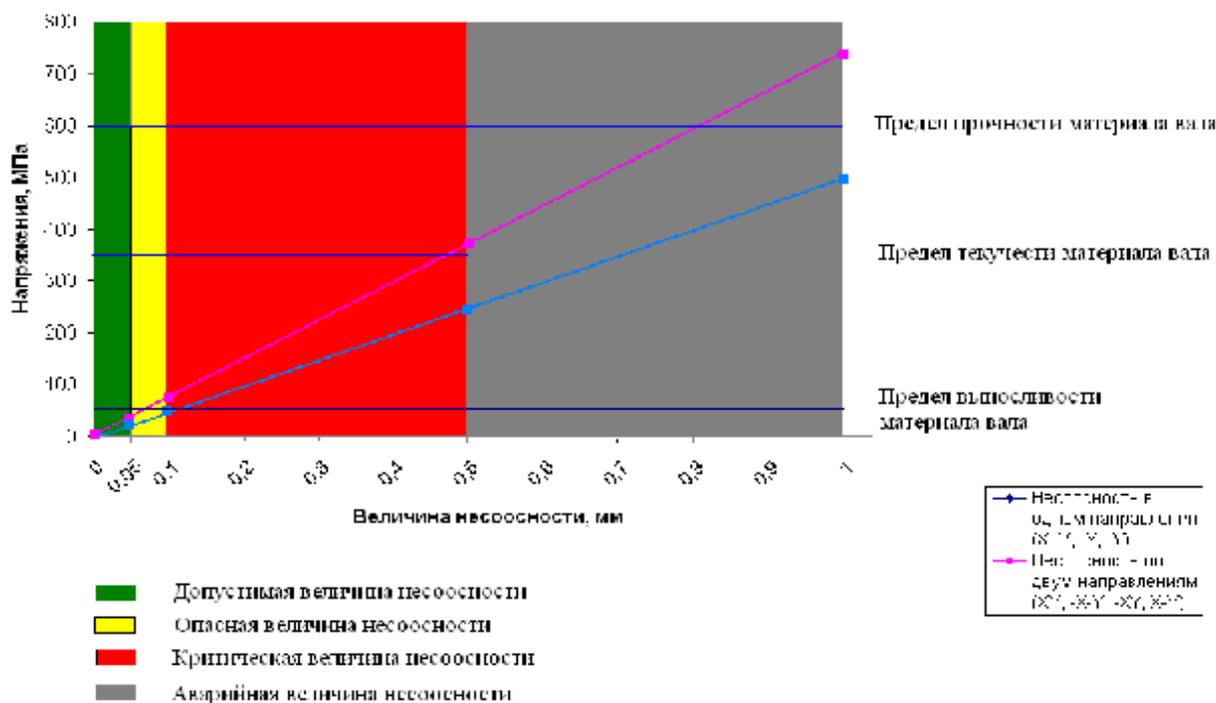


Рис. 8. Зависимость напряжений, возникающих на валу двигателя, от величины несоосности с промежуточным валом

Анализ осуществлялся в двух вариантах – расчёт напряжений при напрессовках сплошной полумуфты и полумуфты с разгружающей выточкой. Для выполнения задачи была использована четверть модели соединения, ввиду полной симметричности. При напрессовке полумуфты напряжения на валу распределяются согласно эпюрам, приведенным на рис. 9.

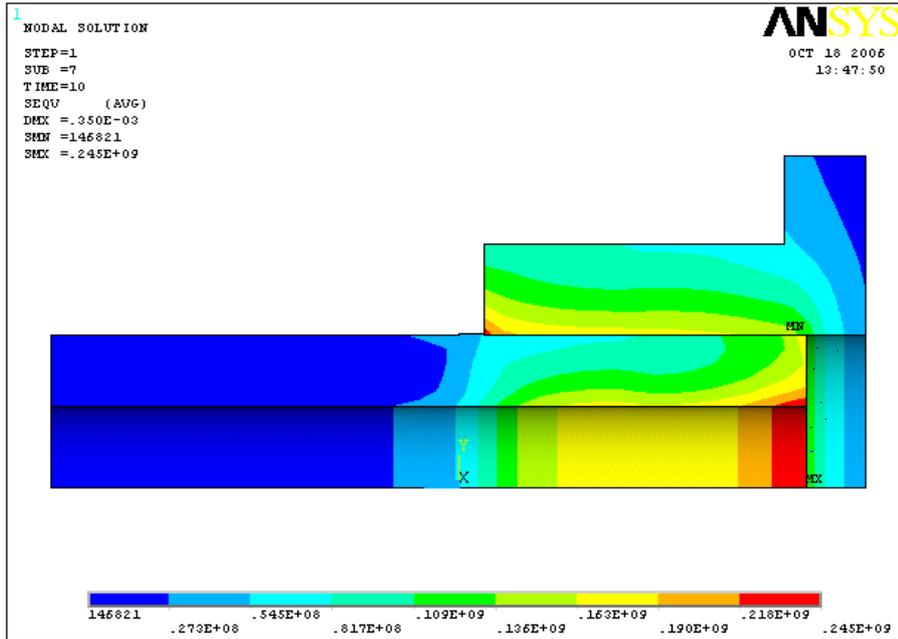


Рис. 9. Эквивалентные напряжения на валу при наличии прессового соединения

Непосредственно в месте излома вала значения напряжений достигают 60 МПа, что видно из графика распределения напряжений по длине сопрягаемого участка вала (рис. 10).

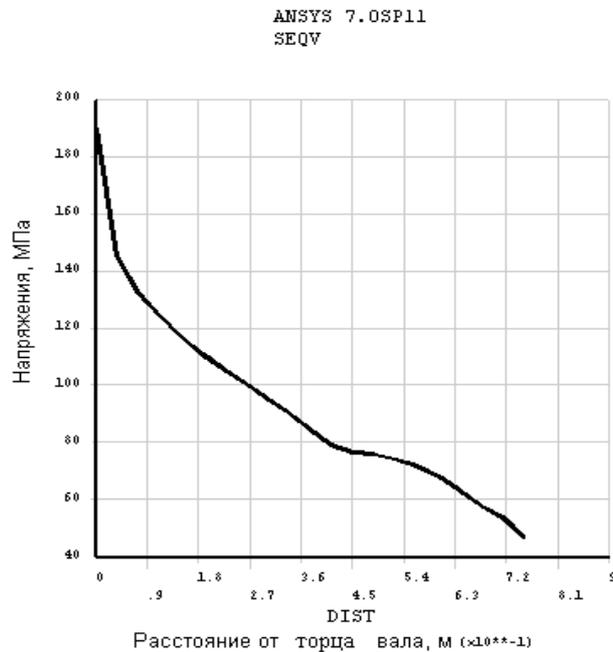


Рис. 10. Распределение напряжений по длине сопрягаемого участка вала

При напрессовке полумуфты с разгружающей выточкой происходит снижение уровня возникающих напряжений на валу (рис. 11). В данном случае наблюдается

снижение максимальных значений напряжений на валу с 245 МПа до 220 МПа, однако непосредственно в месте излома вала величина напряжений осталась прежней.

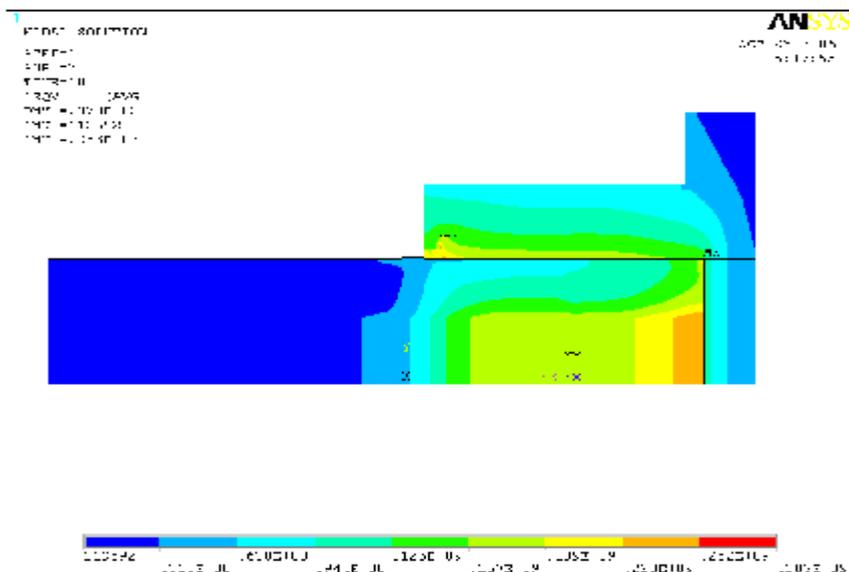
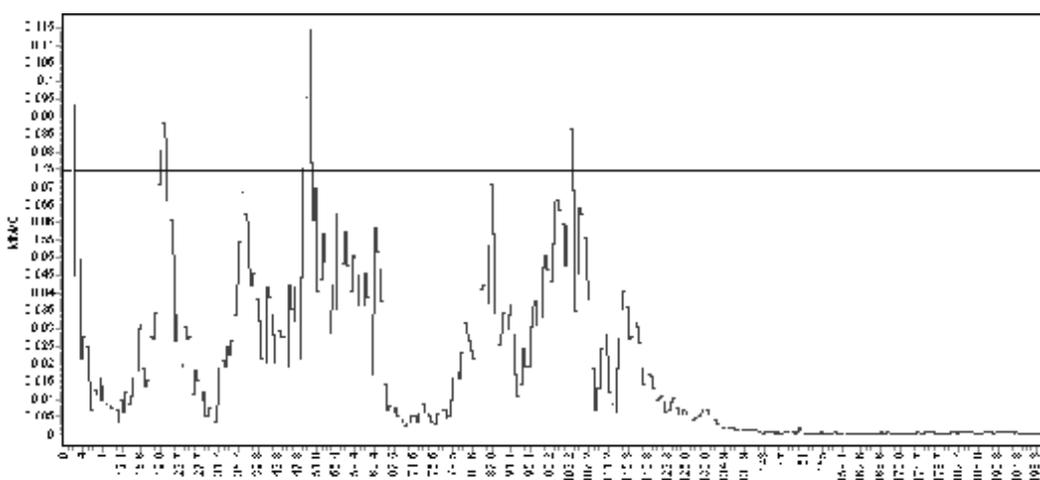


Рис. 11. Эквивалентные напряжения при напрессовке полумуфты с разгружающей выточкой

Для проверки возможности возникновения явления резонанса в системе был проведен анализ частот и мод собственных колебаний приводной линии прокатной клетки [3]. Это явление возникнет при совпадении полученных значений частот со значениями угловой скорости вращения конструкции, которые лежат в пределах 6,28...10,47 рад/с. После проведения анализа были определены следующие значения частот собственных колебаний системы: 30,6 Гц; 44,3 Гц; 66,9 Гц; 71,0 Гц; 78,0 Гц; 95,0 Гц; 99,8 Гц; 100,0 Гц. Фактически, при проведении измерения вибрационных параметров, зафиксированы резонансные пики на частотах: 20 Гц; 36 Гц; 50 Гц; 87 Гц; 103 Гц (рис. 12). Ударное воздействие на систему осуществлялось при работе в режиме холостого хода замыканием зазора вкладыш – лопасть.



Областная производственная организация «ВПК» (2007/04/18 11:40:22 - БИФ Пискарев (400))

Рис. 12. Резонансы механической системы привода нижнего вала

ВЫВОДЫ

Поломка вала стала следствием воздействия целого комплекса факторов. Принимая во внимание тот факт, что вал отработал около 30 лет, с достаточной уверенностью можно говорить о том, что несоосность валов была в пределах допустимых значений. Наиболее весомый «вклад» в поломку вала внес метод напрессовки полумуфты, который не только значительно повысил уровень возникающих напряжений в месте излома, но и снизил сопротивление усталости вала в 2...3 раза. Прибавляя ко всему этому динамические нагрузки, возникающие в процессе работы клетки, а также возможные перегрузки, получаем объективную картину, объясняющую разрушение вала.

Перечень ссылок

1. Сидоров В.А., Кухтинов В.М., Ошовская Е.В. Последовательность анализа аварийных разрушений деталей металлургического оборудования/Металлург. процессы и оборуд-ние.–2006.-№2.–С.33–36.
2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практич. руководство.-М.:Едиториал УРСС, 2003.- 272с.
3. Введение в компьютерный конструкционный анализ: методические указания по курсу «Компьютерная диагностика» / О.М. Огородникова.- Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2001. - 47 с.

Статья поступила 01.06.2009.

Рецензент: д.т.н., проф. Ищенко А.А.