

По аналогии была получена формула зависимости  $T = f(V, S, D)$  при обработке концевым инструментом

$$T = 187,95 \cdot \frac{V^{3,33}}{S^{0,86} \cdot D^{3,43}}$$

**Заключение.** Полученные результаты наглядно иллюстрируют картину тепловыделения в процессе обработки концевым инструментом, так как математический аппарат метода конечных элементов позволяет с определенной степенью точности определять значение искомой величины в любой точке исследуемого объекта.

Полученные математические модели на основе метода конечных элементов позволяют еще на стадии проектирования технологического процесса изготовления судить о температурах, возникаю-

щих в области контакта обрабатываемой поверхности заготовки с инструментом, находить величины тепловых деформаций и на этой основе прогнозировать точность обработки изделия.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тепловые процессы в технологических системах / Резников А.Н., Резников Л.А. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
2. Зенкевич, О.Н. Метод конечных элементов в технике / О.Н. Зенкевич – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
4. Жолобов, А.А. Прогнозирование поведения технологических систем на стадии их проектирования / А.А. Жолобов – Могилев: МГТУ, 2000. – 286 с.

Материал поступил в редакцию 09.03.09

#### PASHKEVICH V.M., MIRONOVA M.N. Finite-element analysis of the temperature fields arising at processing by the trailer tool

The thermal emission during processing by the trailer tool is considered. The finite-element analysis of the temperature fields arising at processing with various cutting parameters is described. The mathematical models received on the basis of a method of finite elements are brought. These models allow to judge on a design stage of technological process of manufacturing the temperatures arising in the field of contact of a processable surface of workpiece with the tool.

УДК 621.87.004.001.5(476)(083.13)

Лисовский А.Л.

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

**Введение.** Износ парка грузоподъемных машин в республике Беларусь составляет 70–80% - в Витебской области 80–90%. Определения механических характеристик металла неразрушающим методом при оценке остаточного ресурса грузоподъемных кранов – важная народнохозяйственная задача, так как замена их, особенно в условиях мирового финансового кризиса, неподъемная на многих предприятий задача. Выпускаемая в Республике Беларусь номенклатура кранов крайне ограничена, закупка импортных – дорого.

**Аналитический обзор.** Применяемые варианты оценки позволяют в какой-то мере контролировать любые участки конструкции без их разрушения, в том числе в местах наибольших силовых воздействий, как в основном металле, так и в сварных швах без отбора проб металла и изготовления образцов для механических испытаний.

Определение расчетного сопротивления материала определяется по результатам измерения твердости.

Твердость определяется твердомерами (например, ТЭМП-2) прошедшими метрологическую аттестацию соответствующих шкал измерения, например, по НВ.

В зависимости от измеренной твердости материала на момент технического диагностирования выполняется сравнение результата с допустимым интервалом значений, оценивающих состояние материала, по формуле

$$0,8 \leq \frac{R_{yn}^{insp}}{R_{yn}} \leq 1,2, \quad (1)$$

где  $R_{yn}^{insp}$  – усредненное значение предела текучести материала при диагностировании, взятое из наиболее стабильных ее показателей (не менее 10), определяемое неразрушающим способом по твердости;

$R_{yn}$  – предел текучести материала в исходном состоянии (ГОСТ, ТУ, сертификат или проектная марка исследуемой конструкции), МПа.

*Дополнительные особенности оценки остаточного ресурса кранов мостового типа экспертным методом.* При оценке остаточного ресурса кранов мостового типа экспертным методом руководствуются следующим:

- для кранов групп классификации А1–А2 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и срока службы стальных канатов не менее 15 лет, средней периодичности замены (или капитального ремонта) узлов механизмов не менее 20–30 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п., назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 25 лет;
- для кранов групп классификации А1–А2 при невыработанном паспортном ресурсе крана (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не менее 10 лет, средней периодичности замены (или капитального ремонта) узлов механизмов не менее 10–15 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п., назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 15 лет;
- для кранов групп классификации А1–А2 при превышении календарной наработки паспортного ресурса сверх установленной предельной нормы возможно назначить календарный остаточный ресурс экспертным методом до 15 лет;
- для кранов групп классификации А1–А2 при превышении календарной наработки паспортного ресурса на 50% и более сверх установленной предельной нормы возможно назначить календарный остаточный ресурс экспертным методом до 5 лет;
- для кранов группы классификации А3 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не

Лисовский Александр Леонидович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой технологии конструкционных материалов Полоцкого государственного университета.

Беларусь, ПГУ, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.

- менее 7,5 лет, средней периодичности замены (капитального ремонта) узлов механизмов не менее 10-15 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п., назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 20 лет;
- для кранов группы классификации А3 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не менее 5 лет, средней периодичности замены (капитального ремонта) узлов механизмов не менее 7,5 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п., назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 10 лет;
  - для кранов группы классификации А3 при превышении наработки паспортного ресурса сверх установленной предельной нормы возможно назначение календарного остаточного ресурса экспертным методом до 15 лет, при условии подтверждения этого соответствующим усталостным расчетом;
  - для кранов группы классификации А3 независимо от наработки при наличии отремонтированных трещин усталостного характера (новых или ранее обнаруженных) обязательна проверка конструкции с применением методов неразрушающего контроля, а также подтверждении этого соответствующим усталостным расчетом. При положительных результатах проверки возможно назначение календарного остаточного ресурса экспертным методом до 7,5 лет;
  - для кранов групп классификации А4–А5 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не менее 3 лет, средней периодичности замены (капитального ремонта) узлов механизмов не менее 5–10 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п., назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом на момент проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 20 лет;
  - для кранов групп классификации А4–А5 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не менее 1,5 лет, средней периодичности замены (капитального ремонта) узлов механизмов не менее 5–8 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п., назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 10 лет;
  - для кранов групп классификации А4–А5 при превышении наработки паспортного ресурса сверх установленной предельной нормы возможно назначение календарного остаточного ресурса экспертным методом до 10 лет, при условии подтверждения этого соответствующим усталостным расчетом;
  - для кранов групп классификации А4–А5 независимо от наработки при наличии отремонтированных трещин усталостного характера (новых или ранее обнаруженных) обязательна проверка конструкции с применением методов неразрушающего контроля, а также подтверждении этого соответствующим усталостным расчетом. При положительных результатах проверки возможно назначение календарного остаточного ресурса экспертным методом до 5 лет.

*Балльная методика определения остаточного ресурса кранов мостового типа.* При определении остаточного ресурса несущих металлических конструкций кранов владелец сообщает комиссии ориентировочный срок, на время которого предполагается продол-

жить эксплуатацию кранов и который должен быть затем включен во все последующие расчеты. При отсутствии предложений со стороны владельца крана указанный срок назначает комиссия, выполняющая оценку остаточного ресурса.

Решение о необходимости оценки остаточного ресурса и условиях дальнейшей эксплуатации кранов по состоянию металлоконструкций принимает комиссия с учетом следующих рекомендаций:

- при суммарном числе баллов не более 3 остаточный ресурс может не оцениваться;
- при суммарном числе баллов более 3, но менее 5, кран, после выполнения соответствующих оценок и проведения ремонта, как правило, может эксплуатироваться с паспортной грузоподъемностью в течение срока, на который оценивался его остаточный ресурс;
- при суммарном числе баллов от 5 до 10 включительно, в случае, когда имеются отдельные дефекты, оцененные не менее 3 баллов, грузоподъемность крана, как правило, должна быть снижена не менее чем на 25 % и кран переведен в более низкую режимную группу;
- при суммарном числе баллов более 10 кран подлежит снятию с эксплуатации и списанию, либо должен быть подвергнут ремонту с заменой дефектного узла.

*Балльная методика определения остаточного ресурса стреловых самоходных кранов общего назначения.* Остаточный ресурс должен определяться в зависимости от вида ведущего повреждения по критериям:

- усталости, коррозии, износа (если имеется).
- Остаточный ресурс по критерию усталости должен определяться при первичном и повторных технических диагностированиях. При этом на ограниченную усталость от действия нагрузок рабочего состояния должны быть проверены расчетным путем: основная стрела и элементы ее крепления;
- выносные опоры; другие узлы специальных шасси, на которые передаются нагрузки во время работы кранов.
- Каждому дефекту соответствует определенное количество баллов, определяемое по таблице 2.
- Решение о возможности дальнейшей эксплуатации принимает комиссия с учетом рекомендаций аналогичных мостовым кранам.

*Однако методики оценки ресурса расчетом на трещиноустойчивость методическими рекомендациями не предлагаются.*

**Предлагаемая методика расчета ресурса грузоподъемных кранов.** Прочность и надежность сварных конструкций в значительной степени зависит от особенностей технологического процесса сварки, которые проявляются в изменении физико-механических свойств определенных зон сварного соединения, в создании собственных полей напряжений и технологических концентраторов напряжений. Указанные факторы могут привести к существенной потере несущей способности сварных конструкций, а степень их негативного влияния определяется параметрами нагружения и условиями эксплуатации конкретных элементов конструкций. Поэтому при диагностировании кранов необходимо проводить расчетные оценки влияния технологической наследственности на ресурс тяжело нагруженных сварных объектов.

В [2] рассматриваются методы и алгоритмы расчета продолжительности стадии зарождения и стадии стабильного развития макротрещины при поличастотном нагружении. Обсуждаются вопросы, взаимодействия собственных и рабочих напряжений при различных схемах нагружения, даются методы расчета концентрации напряжений и их влияние на различные стадии процесса разрушения.

*Расчет пороговых характеристик.* Конструктивные критерии прочности разделяются на пороговые (пороговые коэффициенты интенсивности напряжений  $K_{thR}$ ,  $\Delta K_{thR}$  предел усталости  $\sigma_{FR}$ ) и критические ( $K_{1C}$ ,  $\sigma_{1C}$  – критическое раскрытие трещины).

Таблица 1

Виды дефектов	Характеристика дефектов		
	Дефекты изготовления или монтажа	Дефекты, возникшие из-за грубого нарушения нормальной эксплуатации	Дефекты, возникшие при нормальной эксплуатации
	Количество баллов		
1. Нарушение лакокрасочного покрытия	0,5		
2. Коррозия ответственных элементов: до 5% толщины элемента включительно до 10% толщины элемента включительно свыше 10% толщины элемента	Возникновение подобного дефекта маловероятно	0,2 1 4	
3. Трещины, разрывы в швах или в околошовной зоне	Возникновение больших трещин маловероятно	1	4
4. Трещины разрывы в зонах, удаленных от сварных швов	Возникновение больших трещин маловероятно	1	5

Таблица 2. Оценка дефектов в баллах [1]

Виды дефектов	Характеристика дефектов		
	Дефекты изготовления или монтажа	Дефекты, возникшие из-за грубого нарушения нормальной эксплуатации	Дефекты, возникшие при нормальной эксплуатации
	Количество баллов		
1. Нарушение лакокрасочного покрытия	0,5		
2. Коррозия ответственных элементов: до 5% толщины элемента включительно до 10% толщины элемента включительно свыше 10% толщины элемента	0,2 1 10		
3. Трещины, разрывы в швах или в околошовной зоне	1	1	4
4. Трещины разрывы в зонах, удаленных от сварных швов	1	1	5
5. Ослабление болтовых соединений, в которых болты работают на растяжение (а также износ резьбы винтовых опор)	0,5	0,5	1
6. Ослабление болтовых соединений, в которых болты работают на срез	2		
7. Деформации элементов решетчатых конструкций, превышающие предельные значения: пояса элементы решетки	1	2,5	5
	0,5	1	2
8. Деформации элементов листовых конструкций, превышающие предельные значения	1	1,5	5
9. Расслоение металла	5		
10. Смятие проушин и выработка отверстий в шарнирах, превышающие предельные значения	1	1,5	3
11. Любые дефекты, возникшие в месте предыдущего ремонта	1	2	5

$$K_{th} = \sqrt{\frac{(R_{MCe} \cdot D)^{\left(\frac{1}{m}+1\right) \cdot 4\pi \cdot d_{cmp}}}{\sigma_T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \cdot 1,7}}, \quad (2)$$

где  $d_{cmp}$  – это структурный параметр, определяющий свойства пластически сформированной структуры. Величина этого параметра зависит от эволюции структуры в процессе деформирования и механизма микроскола. Для малоуглеродистых сталей при зеренном механизме микроскола  $d_{cmp} \approx d_3/2,7$ . При цементитном микроме- ханизме скола  $d_{cmp}$  имеет порядок характерного размера блока перлитной колонии, у которой кристаллографическая направленность цементитной и ферритной фазы совпадает.

$$D = \frac{(1+m)(1-2\mu)}{2}. \quad (3)$$

Коэффициент перенапряжения  $D$ , учитывающий повышение  $\sigma_1$  в случае сложного напряженного состояния.

Коэффициент упрочнения  $m$ .

$$m = 0,75 \left\{ \frac{\lg \left[ \frac{\sigma_e (1 + 1,4\varphi_k)}{\sigma_{02}} \right]}{\lg \left[ \left( 10^5 \ln \frac{1}{1-\varphi_k} \right) / (200 + 0,5\sigma_{02}) \right]} \right\},$$

где  $\varphi_k$  – поперечное сужение.

Известно, что для материалов, обладающих большим запасом пластичности, в вершине трещины развиваются значительные деформации. Поэтому в зоне предразрушения образуется фрагментированная структура, наиболее вероятный размер которой, в  $2,6 \div 2,8$  раза меньше размера зерна. Максимальное значение  $R_{MCe}$  для указанных материалов примерно в  $1,6 \div 1,65$  раза больше  $R_{MC}$  недеформированного металла. Так как для сталей, которые ведут себя как гомогенные материалы

$$R_{MC} = 5,7 d_3^{-1/2},$$

где  $d_3$  – размер зерна, то подставляя вместо  $d_{cmp} = d_3 / (2,6 \div 2,8)$

$$R_{MCe} \approx (1,6 \div 1,7).$$

Экспериментально установлено для большой группы углеродистых и малолегированных сталей взаимосвязь между  $R_{MC}$ , временным сопротивлением разрыву, и относительным поперечным сужением

$$R_{MC} = \sigma_{ep} \frac{1}{1-\varphi^2}.$$

Результаты многочисленных экспериментов [3] показывают, что коэффициент асимметрии цикла и пороговый размах коэффициента интенсивности напряжений связаны линейной зависимостью до

значений  $r = 0,8$ . При  $r > 0,8$  пороговые значения  $\Delta K_{thr}$  практически остаются постоянными.

$$\Delta K_{thr} = K_{th0} + (r/0,8) \cdot (\Delta K_{th0,8} - K_{th0}), \quad (4)$$

$$\Delta K_{th0,8} = 3 \cdot [МПа \cdot m^{1/2}] - 0,0008 [m^{1/2}] \cdot \sigma_T. \quad (5)$$

**Расчет предела выносливости.** Возможность аналитических оценок  $K_n$  обеспечивает теоретическое определение предела выносливости металла при любых параметрах цикла нагружения:

$$\sigma_{Fr} = \sigma_{fc} \left[ \pi l \frac{\sigma_{fc}^2}{K_{thr}^2} + 1 - \mu + \mu^2 \right]^{-0,5}, \quad (6)$$

где  $G_{Fr}$  – предел выносливости;  $l$  – длина трещины;  $\sigma_{fc}$  – циклический предел текучести ( $\sigma_{fc} = 0,7\sigma_T$ );  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $K_{thr}$  – пороговый коэффициент интенсивности напряжений при соответствующей асимметрии цикла.

$$K_{thr} = \frac{\Delta K_{thr}}{(1-r)}, \quad (7)$$

где  $\Delta K_{thr}$  – предельный размах коэффициента интенсивности напряжений.

Модифицируем уравнение (5) подставив в него вместо  $K_{thr}$  выражение (7)

$$\sigma_{Fr} = 0,7\sigma_{fc} \left[ \pi l \frac{0,49 \cdot \sigma_T^2 (1-r)^2}{\Delta K_{thr}^2} + 1 - \mu + \mu^2 \right]^{-0,5} \quad (8)$$

Так как  $\Delta K_{th0}$  при отнулевом цикле ( $r = 0$ ) согласно (6) равен  $K_{th0}$ , а  $K_{A0}$  рассчитывается по формуле (1), то, используя (2), (6), (4) и (5), можно рассчитать предел выносливости для любой асимметрии цикла.

При изменении параметров нагружения – среднего напряжения ( $\sigma_m$ ) и коэффициента асимметрии цикла ( $R_a$ ), например, при переходе от симметричного цикла к отнулевому становятся иными пределы выносливости и пределы ограниченной выносливости. Зависимость пределов выносливости от среднего напряжения цикла и коэффициента асимметрии цикла обычно отражается графически в виде диаграммы.

Применительно к сварным конструкциям наибольшее распространение получила диаграмма, отражающая зависимость между значениями предельных напряжений  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$  и значениями средних напряжений цикла  $\sigma_m$ .

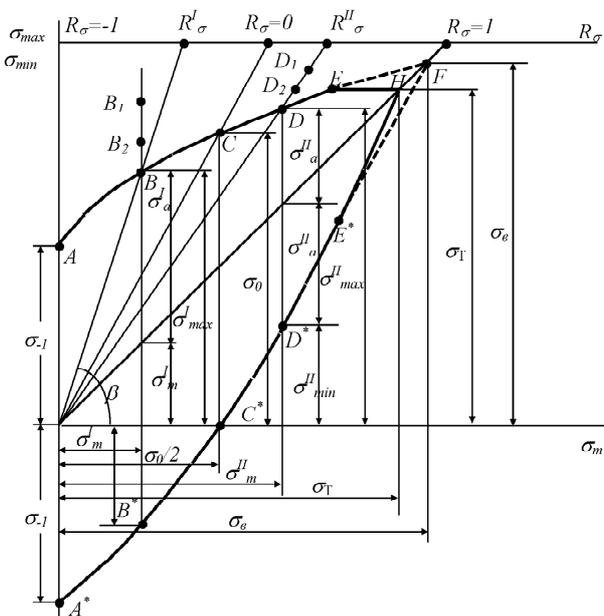


Рис. 1. Диаграмма предельных напряжений цикла

**Расчет критических характеристик.** Критический коэффициент концентрации напряжений вычисляется по формуле:

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{(R_{MCe} \cdot D)^{\frac{1}{m+1}} \cdot \pi \cdot 6,18d_3}{q^{\frac{1}{m+1}} \cdot \sigma_T^{\frac{1}{m+1}}}}, \quad (9)$$

где  $q = 1 - \frac{2}{\sqrt{3}} D$ .

При оценке прочностных свойств материалов либо элементов конструкций часто используют критерий  $\delta_{1C}$  (критическое раскрытие трещины – КРТ).

$$\delta_{1C} = \lambda \frac{K_{IC}^2}{E\sigma_T}. \quad (10)$$

Критерий КРТ связан с  $K_{IC}$  известной в механике разрушения зависимостью (10).

Тогда для критической ситуации в точке  $0,618d_3$  от вершины трещины можно записать

$$\frac{D^{\frac{1}{m+1}} R_{MCe}^{\frac{1}{m+1}}}{q^{\frac{1}{m+1}}} = \frac{\sigma_T^{\frac{1}{m+1}} \cdot (1-2\mu)^2}{2\pi \cdot 0,618\delta_{1C}} \cdot K_{IC}. \quad (11)$$

Для определения  $\delta_{1C}$  по (10) необходимо найти коэффициент  $\lambda$ . Учитывая приведенные выше результаты, примем, что критический скачок трещины равен  $0,618d_3$ . Кроме того, воспользуемся известным постулатом о том, что размеры зоны максимального повреждения материала в направлении раскрытия трещины приблизительно одного порядка.

Из (10) и (11) получим

$$\lambda = \frac{q^{\frac{1}{m+1}} \sigma_T^{\frac{1}{m+1}} \cdot (1-2\mu)^2 E}{R_{MCe}^{\frac{1}{m+1}} \cdot 1,24\pi \cdot D^{\frac{1}{m+1}}}. \quad (12)$$

**Оценка продолжительности стадии зарождения макротрещины.** Процесс усталостного разрушения обычно разделяют на две стадии, продолжительность которых является основными составляющими ресурса изделия: образование макротрещины и устойчивое ее развитие до критических размеров.

Основу предлагаемого расчетного метода составляет гипотеза накопления повреждений, предложенная Генри, согласно которой, поврежденность при усталости может быть определена как отношение величины уменьшения предела выносливости к пределу выносливости исходного материала

$$D = (\sigma_{Fr}^0 - \sigma_{Fr}) / \sigma_{Fr}^0, \quad (13)$$

где  $D$  – поврежденность;  $\sigma_{Fr}$ ,  $\sigma_{Fr}^0$  – пределы выносливости исходного и поврежденного металла, соответственно.

При формулировке гипотезы Генри предполагается также, что кривая усталости может быть аппроксимирована выражением

$$N = \frac{k}{\sigma - \sigma_{Fr}^0}, \quad (14)$$

где  $\sigma$  – амплитуда приложенного напряжения;  $k$  – постоянная материала;  $N$  – количество циклов до появления макротрещины.

При накоплении повреждений форма кривой усталости не меняется

$$N_r = \frac{k}{\sigma - \sigma_{Fr}}, \quad (15)$$

где  $N_r$  – оставшееся количество циклов до разрушения.

Отсюда соотношение  $N_r/N$ , определяющее долю остаточного ресурса

$$\frac{N_r}{N} = \frac{\sigma_{Fr} (\sigma - \sigma_{Fr}^0)}{\sigma_{Fr}^0 (\sigma - \sigma_{Fr})}. \quad (16)$$

Рассчитав количество циклов развития макротрещины от своего минимального размера до критического, можно рассчитать полный и остаточный ресурс элементов конструкций при любых параметрах нагружения и для любой поврежденности металла, полученной на первой стадии.

В области малых трещин существует такой размер микротрещины ( $l_0$ ), меньше которого трещины не влияют на предел выносливости

$$l_0 = (0,03...0,1)(K_{th}/\sigma_T)^2, \quad (17)$$

где 0,03 – коэффициент для гипотезы Хубера-Мизеса;

0,1 – коэффициент для гипотезы Сен-Венана-Треска.

Так как трещина размером  $l_0$  не изменяет предел выносливости, то можно принять, что такие трещины имеют место в исходном материале и предел выносливости неповрежденного металла нужно вычислять по формуле (5), подставляя вместо  $l$  значение  $l_0$ , рассчитанное по (17). При повреждении металла развивается система микротрещин, которая характеризуется определенным законом распределения. Функцию распределения  $l$  для поврежденного металла необходимо находить экспериментально, используя неразрушающие металлографические и капиллярные методы обнаружения поверхностных трещин. Определив функцию распределения размеров микротрещин для обследуемого элемента и назначив точность оценки, можно найти искомый размер  $l$ , определяющий значение предела выносливости поврежденного материала.

Величину макротрещины, которая соответствует окончанию первой стадии, можно определить из аналитической зависимости (2), в которой надо вместо  $K_{th}$  подставить выражение

$$K_{th} = \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi L} \cdot M, \quad (18)$$

где  $\sigma_{max}$  – максимальное напряжение в цикле нагрузки;  $L$  – минимальная длина макротрещины;  $M$  – коэффициент поправки на форму трещины.

Отсюда следует, что минимальный размер макротрещины определяется не только структурой материала, но и величиной нагрузки. Причем, чем выше нагрузка, тем меньше длина указанной трещины, то есть тем меньше продолжительность первой стадии.

$$L = \frac{(R_{MCe} \cdot D)^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \cdot 2,35d_{cmp}}{\sigma_T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \cdot \sigma_{max}^2 \cdot M^2}. \quad (19)$$

Зависимость (19) справедлива только в том случае, когда внешние условия нагружения обеспечивают возможность использования концепции коэффициента интенсивности нагружения.

Таким образом, мы имеем возможность выполнить оценку остаточного ресурса стадии зарождения макротрещины на базе сведений о фактической поврежденности металла и простых полуэмпирических моделей, если расчетным путем определим стадию стабильного развития макротрещины.

*Оценка продолжительности стадии развития макротрещины.* Продвижение трещины на дискретном шаге будет определяться на основании деформационного критерия, включающего усталостное повреждение от размаха интенсивности пластической деформации и накопление односторонней пластической деформации в структурном элементе в вершине трещины.

$$\frac{\Delta e_i^P \cdot N^m}{c} + \frac{\varepsilon_i^P}{\varepsilon_f^P} = 1, \quad (20)$$

где  $\Delta e_i^P$  – размах интенсивности пластических деформаций в вершине трещины;  $N$  – количество циклов, необходимых для продвижения трещины на шаг  $\Delta L$ ;

$c$  и  $m$  – коэффициенты уравнения Коффина – Мэнсона ( $m = 0,5$  для сталей  $\sigma_s < 700$  МПа,  $c = 0,51 \ln(1-\psi)^{-1}$ ),

где  $\psi$  – относительное сужение);  $\varepsilon_i^P$  – интенсивность пластических деформаций;  $\varepsilon_f^P = \ln(1-\psi)^{-1}$  – критическая пластическая деформация.

Исходя из (20), число циклов нагружения, необходимых для разрушения первого структурного элемента в упругопластической зоне, обратно пропорционально повреждаемости этого элемента

$$N(d_{cmp}) = \left( \frac{\Delta e_i^P}{c} \right)^{1/m}, \quad (21)$$

где  $\Delta e_i^P$  – размах интенсивности пластической деформации в центре структурного элемента.

Повреждаемость элемента за цикл будет определяться выражением

$$P(d_{cmp}) = \frac{1 - \frac{\varepsilon_i^P}{\varepsilon_f^P}}{\left[ \frac{\Delta e_i^P}{c} \right]^{1/m}}. \quad (22)$$

По мере продвижения трещины каждый структурный элемент в упругопластической зоне претерпевает свой путь упругопластического деформирования до разрушения и получает на каждом шаге определенное повреждение. Поэтому повреждаемость последующих структурных элементов, находящихся в упругопластической зоне, в момент разрушения будет определяться на основе критериев деформационного повреждения.

В соответствии с этим, количество циклов, необходимых для разрушения каждого структурного элемента, будет определяться по зависимости, учитывающей суммарный размах интенсивности пластической деформации при двухчастотном спектре цикла нагружения:

$$N_{kj} = \frac{1 - \frac{\varepsilon_j^P}{\varepsilon_f^P} - \sum_{j=1}^{k-1} P_{kj}}{\left[ \frac{\Delta e_i^P(k)}{c} \right]^{1/m}}, \quad (23)$$

где  $\sum_{j=0}^{k-1} P_{kj}$  – поврежденность, полученная на предыдущих стадиях

движения трещины;

$k$  – порядковый номер структурного элемента в упругопластической зоне;

$j$  – шаг продвижения трещины на длину  $\Delta L$ ;

$\Delta e_i^P = (\Delta e_i^{PHC} + n_{BЧ} \Delta e_i^{PBЧ})$  – размах интенсивности пластических деформаций в вершине трещины в поле двухчастотного спектра нагрузок;

$\Delta e_i^{PHC}$  – размах интенсивности пластических деформаций в вершине трещины от низкочастотной составляющей двухчастотного спектра нагрузок;

$\Delta e_i^{PBЧ}$  – размах интенсивности пластических деформаций в вершине трещины от высокочастотной составляющей двухчастотного спектра нагрузок;

$n_{BЧ}$  – количество высокочастотных циклов в одном низкочастотном;  $N$  – количество циклов, необходимых для продвижения трещины на шаг  $\Delta L$ ;

$c$  и  $m$  – коэффициенты уравнения Коффина-Мэнсона;

$\varepsilon_i^P$  – интенсивность пластических деформаций;

$\varepsilon_f^P$  – критическая пластическая деформация.

Таким образом, ресурс на стадии устойчивого развития трещины от  $L$  до  $L_k$  будет определяться суммированием количества циклов на каждом шаге продвижения трещины:

$$N_{II} = \sum_L^{L_k} N_{kj}. \quad (24)$$

Для расчета продолжительности развития макротрещины от своего минимального размера до критического с учетом поврежденности металла, полученной на первой стадии, величина приращения дискретного развития макротрещины. Определяется состоянием структуры, критическим КИН и максимальным суммарным напряжением эксплуатационного цикла

$$\Delta L_j = 2 \cdot d_s \cdot (0,618)^z + \frac{2 \cdot (K_{j\max}^2 - K_{(j-1)\max}^2) \cdot 0,618}{K_{IC}^2}, \quad (25)$$

где  $\Delta L_j$  – текущий размер структурного элемента;  $K_{j\max}$  – коэффициент интенсивности напряжений, соответствующий моменту выбора размера структурного элемента на  $j$ -м шаге развития трещины.

**Заключение.** Таким образом, процедура определения ресурса на стадии устойчивого развития трещины представляется следующим алгоритмом:

1. Рассчитываются величины  $K_{th}$  и  $K_{IC}$  по формулам (2) и (9).
2. Рассчитываются размер начальной микротрещины  $L$  (19) и размер критической трещины  $L_k$ , используя (9).
3. Определяется размер зоны упругопластической деформации при плоской деформации:

$$r_p = \frac{1 - 2\mu}{2\pi} \left( \frac{K_{\max}}{\sigma_T} \right)^2. \quad (26)$$

4. Определяется величина шага трещины при  $K_{\max} = K_{th}$  и вычисляется количество ( $n = r_p / d_{cmp}$ ) таких элементов в упругопластической зоне.
5. Вычисляется размах интенсивности пластических деформаций и интенсивность пластических деформаций  $\epsilon_j^p$  в центре каждого структурного элемента, находящегося в упругопластической зоне ( $r_i = r_{th}(k-1/2)$ , где  $k=1, \dots, n$ ).
6. Определяется повреждаемость каждого элемента за цикл на первом шаге продвижения трещины по выражению (22) и количество циклов, необходимых для разрушения первого элемента (23).
7. Вычисляются повреждения, полученные последующими структурными элементами на первом шаге.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методические рекомендации по проведению технического диагностирования грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы. – Мн.: Инженерный центр «БОИМ», 2006. – 328 с.
2. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушений и критерии работоспособности/ В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев: под ред. Б.Е. Патона. – М: Машиностроение, 1996. – 570 с.
3. Майзель, В.С. Сварные конструкции / В.С. Майзель, Д.И. Нарвоцкий – Л: Машиностроение, 1973. – 306 с.
4. Махутоов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М: Машиностроение, 1981. – 272 с.
5. Винокуров, В.А. Сварочные деформации и напряжения. – М: Машиностроение, 1986. – 236 с.

Материал поступил в редакцию 18.10.09

#### LISOVSKI A.L. Methods of the estimation of the remaining resource metallic design machines

The Broughted methodes of the calculation of the remaining resource to metallic designs tap with expired by lifetime. On the grounds of estimations of the influence to technological heredity on resource welded object, length to stage of the generation and stage of the stable development of the rift under frequency load is offered new methods of the estimation of the remaining resource tap. They Are Discussed questions of the interaction own and worker of the voltages under different scheme of the loads, happen to methods of the calculation to concentrations of the voltages and their influence upon different stages of the process of the destruction.

УДК 681.7

**Онысько С.Р., Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Якушевич С.**

### ОСАЖДЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК НА РЕЖУЩИЕ ПЛАСТИНКИ И ИХ ИСПЫТАНИЕ

**Введение.** Несмотря на большое число публикаций, посвященных различным методам плазменного осаждения пленок углерода, понимание процессов, происходящих при этом, остается далеко не полным. В сущности, отсутствуют надежные теоретические оценки параметров плазменного потока (температуры, скорости, концентрации частиц углерода и вспомогательных газов) и характеристик подложки (состав, подготовка поверхности, геометрия взаимодействия с потоком плазмы и т.д.), при которых происходит образование углеродных пленок различного типа.

Существует, однако, большой экспериментальный материал [1–10], анализ которого позволяет высказать ряд достаточно общих соображений о преимуществах и недостатках различных методов. Существует большее число разновидностей методов химического

осаждения углерода из паровой фазы (CVD-методов), различающихся по способам получения плазмы, ее характеристикам, способам управления характеристиками и т.д. Наиболее известными из них являются метод с использованием горячей нити, CVD-методы с электронным возбуждением, разрядом постоянного тока, плазменной струей, генерируемой дуговым разрядом, CVD-метод с использованием радиочастотного возбуждения плазмы, микроволновой плазмы или плазмы, образующейся при горении [7].

С целью увеличения износостойкости режущих твердосплавных пластинок в данной работе предложен CVD-метод с применением сверхзвуковой плазменной струи и проведено осаждение углеродных пленок на их режущие кромки. Основной целью экспериментальных исследований являлось определение оптимальных пара-

**Онысько Сергей Романович**, старший преподаватель кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

**Сазонов Михаил Иванович**, профессор кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

**Хвисевич Виталий Михайлович**, зав. кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

**Якушевич Сергиуш**, к.т.н., зам. декана Высшей государственной профессиональной школы в Сувалках.

Польша, 16400, г. Сувалки, ул. Нуневича 10.