

Л. П. Вовк, д-р техн. наук, Е. С. Кисель

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЧНОСТНОГО РАСЧЕТА ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

*Проведено численное исследование зависимости краевых и граничных динамических эффектов от геометрических и упругих параметров, определяющих неоднородность детали. Определены особенности распределения термоупругих напряжений в зонах динамических эффектов на примере неоднородного термоупругого сечения детали сложной формы.*

**Ключевые слова:** неоднородность детали, термоупругая область, локальная концентрация напряжений, напряженно-деформированное состояние, расчет на прочность, особые точки сечения детали, собственные частоты

### **Введение**

Последние тенденции автомобилестроения направлены на улучшение качества автомобилей, безопасность, надежность и внедрение современных технологий в их конструкцию. Автомобильные компании активно внедряют инновации для повышения конкурентоспособности, поэтому на инженеров оказывается серьезное давление по ускорению разработки и поставки качественных деталей. Чтобы преуспеть, они должны разработать кратчайший по времени способ развития проекта от чертежа до производственных линий. Ключевым элементом при сокращении времени разработки является инженерное моделирование, позволяющее компаниям быстро изменять проект в зависимости от особенностей эксплуатации продукта путем предсказания его реального поведения в виртуальной среде задолго до того, как потребуются испытания. Расчеты с помощью высококачественных верифицированных продуктов ANSYS позволяют инженерам экономически эффективно определять ходовые характеристики и надежность в широком диапазоне автомобильных задач. Автомобильная промышленность обладает огромным потенциалом для моделирования, и описанные в статье моменты – это всего лишь малая часть всех возможностей, применений и задач в данной области.

Рассматривая вопросы инженерного моделирования и проектирования автомобильных деталей, невозможно пренебречь тем фактом, что в течение времени из-за перераспределения и релаксации внутренних остаточных напряжений, вызванных технологическими процессами при изготовлении (литье, сварке, механической обработке и др.), теряется стабильность геометрических и механических параметров деталей автомобилей. Надежность работы таких изделий снижается, что может привести к полному отказу работоспособности или к аварийной ситуации. Поэтому открытым актуальным остается вопрос о расширении производственных технологических возможностей, направленных на внедрение новых технологий, при сохранении стоимости изделия в целом. Актуальность данной работы обоснована возможностью применения подобного рода исследований при проведении прочностных расчетов динамического напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций и деталей машиностроения со сложными физико-механическими свойствами.

Особые параметры металлической детали, в частности наличие дефектов, – особых областей геометрии, т. е. зон существенного изменения некоторых ее физико-механических характеристик, могут провоцировать аномальное изменение поля температурных и механических напряжений.

Вопросам и исследованиям решений задач теории упругости и термоупругости в окрестности угловых точек, принадлежащих линиям раздела нескольких разнородных сред, посвящено достаточно много научных публикаций, среди которых отметим [1–3]. Анализ

публикаций позволяет заметить, что к настоящему времени разработан значительный математический аппарат, предназначенный для решения связанных задач термоупругости. Полученные в этих работах результаты позволяют исследовать влияние температурных параметров на локальную концентрацию напряжений в сингулярных зонах сечений, чаще всего канонических областей. Наиболее распространенной и доступной для исследования, среди такого рода форм сечений, является прямоугольная область.

Именно для такой прямоугольной области в [4–6] авторами ранее проводился расчет распределения напряжений в твердом термоупругом неоднородном теле с учетом локальной концентрации напряжений (ЛКН) в сингулярных точках, для случая сочетания двух сред. Как показала практика численных расчетов, примененная в [5] методика исследования может успешно использоваться и для областей с более сложной границей. Поэтому работы [4–6] стали теоретической и практической основой приведенных ниже результатов расчетов для сечений усложненной формы. Помимо этого, актуальным остается вопрос о геометрической систематизации конфигураций границ областей, что, безусловно, повышает уровень практической значимости применения предложенной численной методики расчета.

При исследовании ЛКН конструкций в зонах геометрической концентрации напряжений необходим комплексный анализ, в частности численный. Для его проведения наиболее приемлемым является метод конечных элементов, широко используемый в современных программных пакетах анализа элементов конструкций, таких как ANSYS, COSMOS/Design, STAR LS Dyna и т. п. Правильно подобранный численный метод проверки прочностных характеристик позволит перейти на новый этап проектирования и эксплуатации, обеспечивающий безопасную работу отдельных деталей и автомобилей в целом, поэтому приведенный далее расчетный подход представляет собой одно из наиболее эффективных средств для исследования НДС составных конструкций в зонах геометрической концентрации напряжений и для дальнейшего учета характера границы и внутренней структуры области с целью минимизации возможных локальных напряжений.

Также следует отметить, что средства термоупругого анализа программы ANSYS позволяют использовать результаты решения задачи теплообмена для проведения прочностного анализа [7]. Такая возможность удобна при определении влияния температурного поля на прочность конструкции. Пользователь может задать параметры тепловой нагрузки отдельно или в совокупности с параметрами механической нагрузки. В данном программном комплексе доступны два способа связывания теплового и прочностного анализов.

Первый состоит в том, что эти два анализа проводятся друг за другом. Сначала получают температурное поле в модели для заданных граничных условий теплообмена. Значения температур затем используются в виде нагрузок на стадиях предпроцессорной подготовки и получения решения при последующем структурном анализе.

Второй способ предусматривает проведение совместного термоупругого решения. В программе ANSYS это достигается использованием комбинированных конечных элементов, которые имеют как тепловые, так и деформационные степени свободы. Из этих элементов создается расчетная модель и задаются тепловые и механические граничные условия. На каждой итерации выполняется решение тепловой и упругой задач с использованием значений температур и перемещений, полученных на предыдущей итерации. Имеется возможность вводить в расчетную модель контактные элементы общего типа. Эти элементы допускают теплопередачу через поверхность контакта. Как только контактные поверхности смыкаются, становится возможным процесс теплообмена.

С помощью процедуры совместного решения возможно объединение таких сложных задач теплообмена и расчета на прочность, как нестационарный тепловой и нелинейный динамический анализы. В предлагаемой работе были проведены расчеты с использованием программного комплекса ANSYS первым способом, т. е. проведение связанного термоупругого расчета последовательным способом.

### Цель работы

Задачей программного анализа стало исследование общего НДС в особых зонах геометрической концентрации напряжений (особых точках и границах сечения) термоупругой однородной и неоднородной областей, его зависимость от геометрических параметров детали и общее исследование конструкции на прочность.

### Основные материалы исследования

В качестве модели детали конструкции рассматривалась стальная однородная деталь с сечением, изображенном на рисунке 1, модель 1 и с сечением той же геометрии, но со сварным швом (рисунок 2). Материал сварного шва представлен аустенитной сталью [8–9]. Варьируя протяженность участка  $AB_{(k)}$ , где  $k = 1, 2, 3$ , будем изменять высоту сечения при сохранении его геометрии. Координаты точек, определяющих область, зададим следующим образом:  $E(-0,99; 0,36)$ ,  $A(0,59; 0,36)$ ,  $B_1(1,29; 0,72)$ ,  $B_2(1,29; 1,08)$ ,  $B_3(1,29; 1,44)$ ,  $C(0,99; -0,36)$ ,  $D(-0,99; -0,36)$ . Термомеханические свойства материалов сечений определяются константами, для стали:  $\rho = 8000 \text{ кг/м}^3$  – плотность;  $E = 1,9 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  – модуль сдвига;  $\nu = 0,29$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha_t = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$  – коэффициент линейного теплового расширения;  $\lambda_0 = 16 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  – коэффициент теплопроводности;  $C = 500 \text{ Дж/К}$  – теплоемкость. Характеристики материала сварного шва (модель 2), аустенитной стали:  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$  – плотность;  $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  – модуль сдвига;  $\nu = 0,291$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha_t = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$  – коэффициент линейного теплового расширения;  $\lambda_0 = 15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  – коэффициент теплопроводности;  $C = 500 \text{ Дж/К}$  – теплоемкость.

Для моделей 1 и 2 в программном комплексе ANSYS был проведен модальный анализ с учетом преднапряженного состояния области. Результатом данного расчета стало вычисление значений первых пятнадцати собственных частот, визуализация соответствующих им форм, с учетом распределения термоупругих напряжений  $\sigma_{xx}$  по площади сечения, что позволило судить о деформации рассмотренной области и участках локализации максимальных значений напряжений.

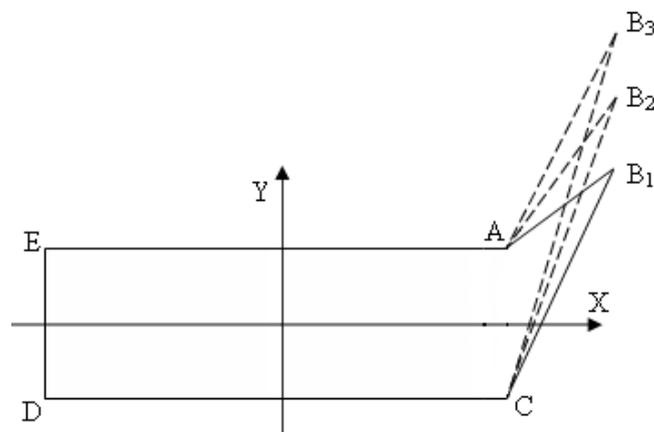


Рисунок 1 – Геометрия исследуемого однородного стального сечения, модель 1

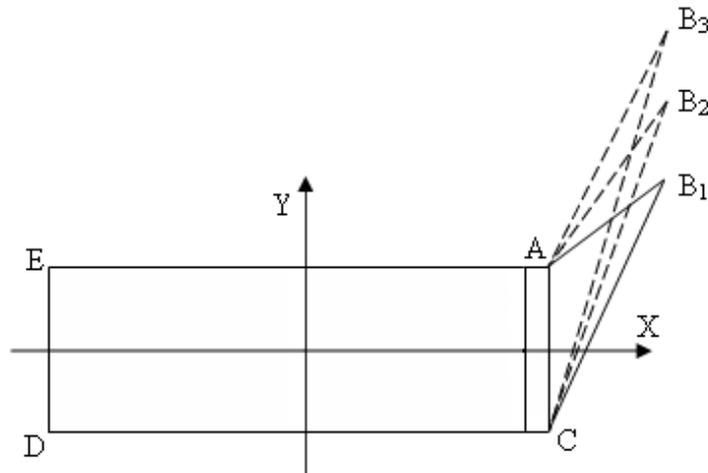


Рисунок 2 – Геометрия исследуемого неоднородного стального сечения со сварным швом, модель 2

Проведенный расчет однородного термоупругого стального сечения (рисунок 1) позволяет сделать следующие выводы:

1. Отход от канонической прямоугольной формы [6] и усложнение конфигурации сечения приводит к общему численному увеличению интенсивности концентрации напряжений.

2. Также, в отличие от прямоугольного сечения [6], наблюдается концентрация напряжений практически на всех частотах.

3. Отмечается локализация напряжений различной интенсивности в проблемных точках А и В (рисунки 3–7), а также в границах сечения (рисунок 5). Наблюдаемые эффекты отмечены стрелками на эпюрах.

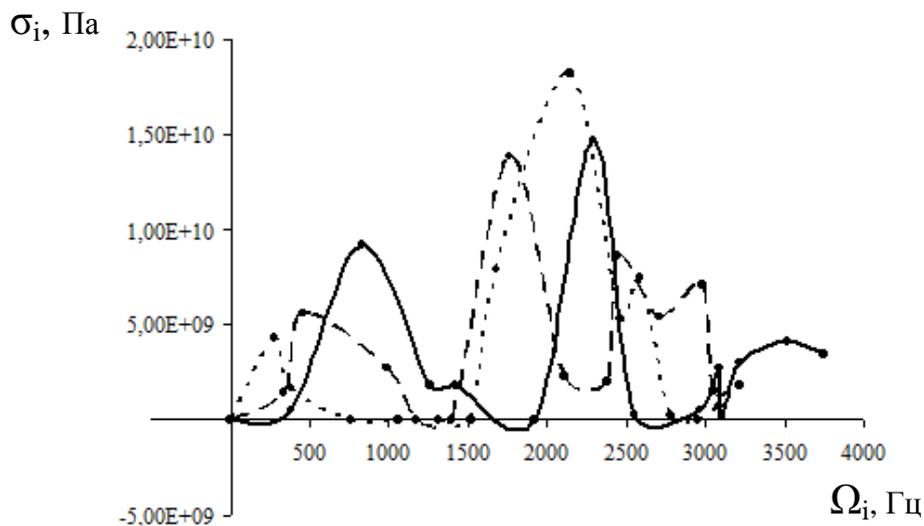


Рисунок 3 – Зависимость значений напряжений  $\sigma_i$ ,  $i = 1..15$  в особой точке А от номера частоты  $\Omega_i$  и площади однородного сечения  $EAB_{(k)}DF$ ,  $k = 1, 2, 3$

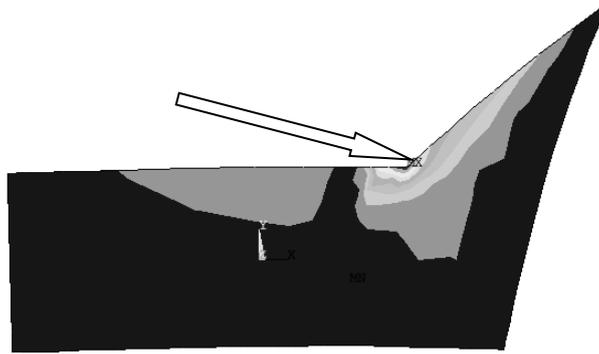


Рисунок 4 – Эпюра распределения напряжений для 4-й частоты однородного сечения, эффект в точке А, модель 1

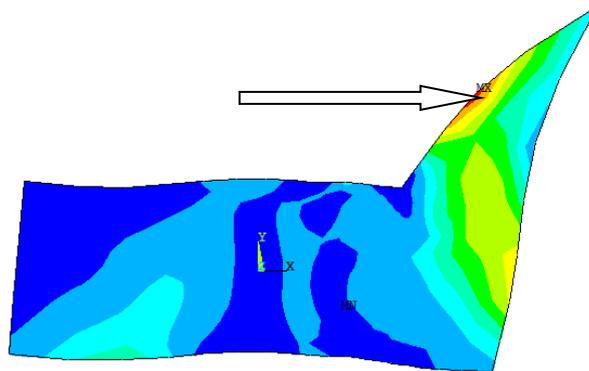


Рисунок 5 – Эпюра распределения напряжений для 9-й частоты однородного сечения, эффект на границе  $AB_{(2)}$ , модель 1

Значительное возбуждение неоднородных волн вблизи вертикальных границ в упругих волноводах со свободными боковыми поверхностями приводит к ряду специфических волновых эффектов, проявляющихся в сильной локализации движения вблизи вертикальной границы, и особенно в зоне ее сингулярности.

Примером такой локализации является краевой резонанс, который выражается в резком увеличении амплитуд смещений в окрестности торца волновода со значительным их убыванием при удалении от торца. Такой вертикальной границей в рассматриваемых моделях выступает участок ED, а участками, условно приравненными к ним, –  $AB_{(k)}$  и  $CB_{(k)}$ .

1. Таким образом, можно отметить наличие одной «основной» частоты – аналога частоты краевого резонанса, на которой очевиден всплеск значений напряжений.

2. Увеличение высоты сечения (протяженности участка  $AB_{(k)}$ ) при сохранении его геометрии, например, при перемещении точки  $B_{(1)}$  в  $B_{(2)}$ , приводит к смещению ЛКН из сингулярной точки А (рисунок 6) на границу  $AB_{(2)}$  (рисунки 4, 5).

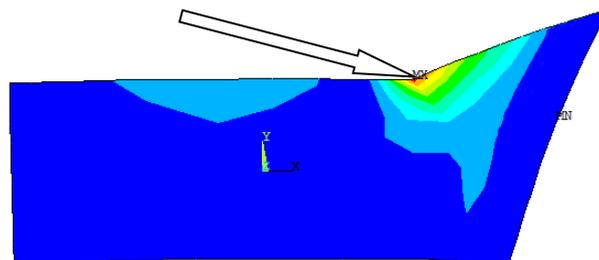


Рисунок 6 – Эпюра распределения напряжений для 5-й частоты однородного сечения, эффект в точке А, модель 1

3. Практически полное отсутствие эффекта краевого резонанса в точке В на низких и средних частотах (рисунки 4–7) и некоторый всплеск на более высоких частотах (рисунок 7). Причем данное явление наиболее очевидно при значительном изменении высоты точки В<sub>(k)</sub>.

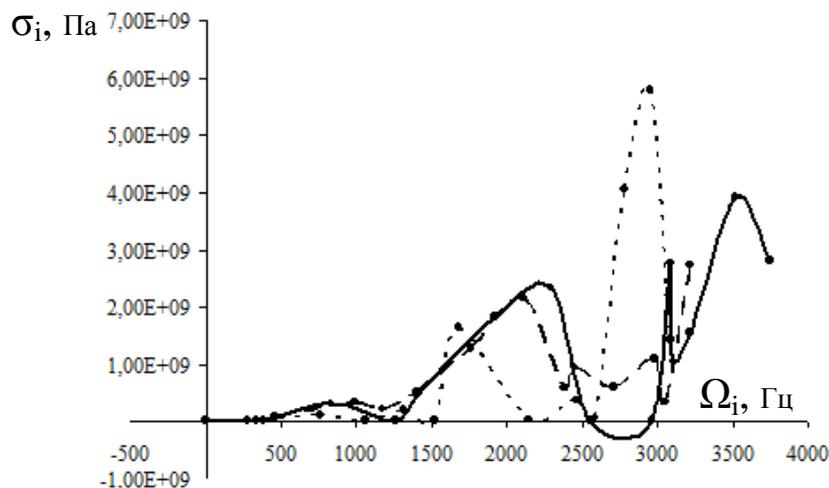


Рисунок 7 – Зависимость значений напряжений  $\sigma_i$ ,  $i = 1 \dots 15$  в особой точке В от номера частоты  $\Omega_i$  и площади однородного сечения  $EAB_{(k)}DF$ ,  $k = 1, 2, 3$

Следует заметить, что аналогичное исследование неоднородного сечения, содержащего сварной шов (рисунок 2), позволяет выявить некоторые существенные отличия, а именно:

1. Наблюдается концентрация напряжений по значительной области сварного шва и захват его окрестности, а не лишь в точке А, что подтверждается сравнением эпюр для 8-й частоты усложненной модели 2 и области прямоугольной формы, имеющей те же термомеханические характеристики (рисунки 8, 9).

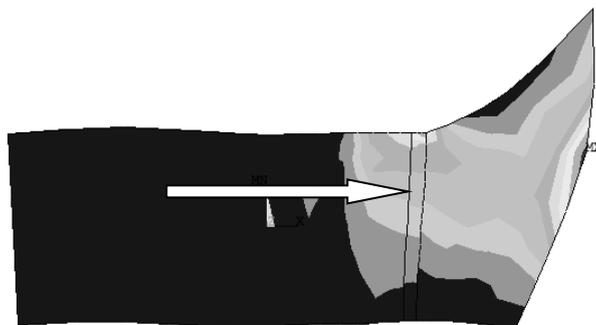


Рисунок 8 – Эпюра распределения напряжений для 8-й частоты, модель 2

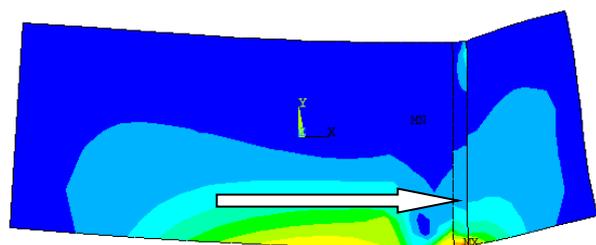


Рисунок 9 – Эпюра распределения напряжений для 8-й частоты области прямоугольной формы

2. Наличие на некоторых частотах краевого резонанса на внешней границе  $СВ_{(k)}$ , например  $СВ_{(1)}$  (рисунок 10).

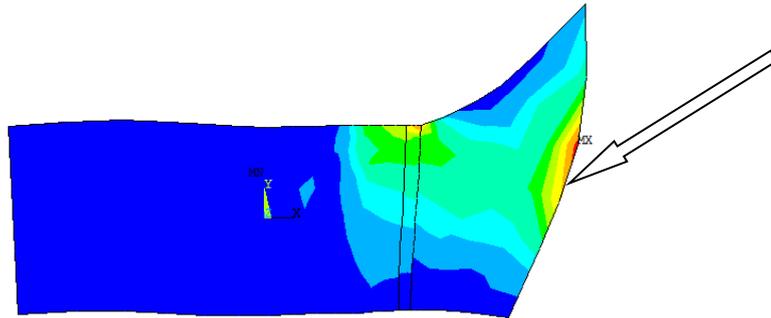


Рисунок 10 – Эпюра распределения напряжений для 8-й частоты однородного сечения, эффект на границе  $СВ_{(1)}$ , модель 2

3. Более яркая ЛКН на границе сварного шва на низких резонансных частотах (рисунки 8–11).

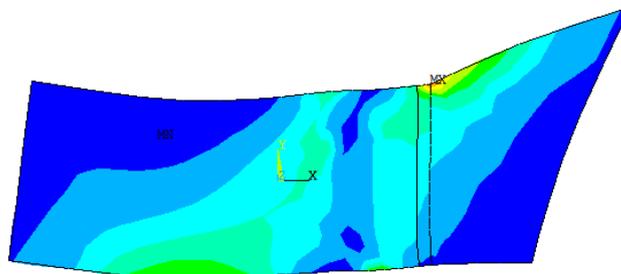


Рисунок 11 – Эпюра распределения напряжений для 5-й частоты, модель 2

4. Аналогично однородному случаю, присутствует всплеск значений напряжений на «основной», восьмой частоте для сечения  $ЕАВ_{(k)}DF, k = 1, 2, 3$  (рисунок 12). Причем с незначительным увеличением высоты сечения отмечается увеличение максимального значения главного напряжения (точка  $8_2$  на графике) и геометрическое распространение его на внешнюю границу.

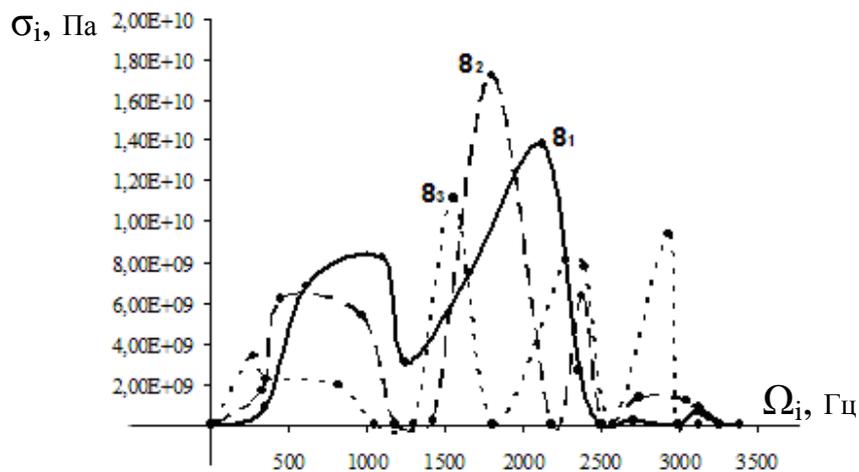


Рисунок 12 – Зависимость значений напряжений  $\sigma_i, i = 1...15$  в особой точке А от номера частоты  $\Omega_i$  и площади неоднородного сечения  $ЕАВ_{(k)}DF, k = 1, 2, 3$

5. При значительном изменении высоты точки  $V_{(k)}$  отмечаются стабильно высокие значения ЛКН в точке А, также происходит увеличение количества собственных частот, на которых отмечается ЛКН (рисунок 12).

### **Выводы**

Учитывая, что ЛКН в точке А имеет локальный характер, и определяется преимущественно упругими параметрами сварных областей, то выводы, сформулированные в работе, могут быть обобщены на случаи неоднородных сечений иной конфигурации с сингулярностью в точке А. Из чего следует, что предложенные методы могут найти свое применение при проведении прочностных расчетов динамического НДС элементов конструкций и деталей машиностроения со сложными физико-механическими свойствами.

Дальнейшим перспективным направлением исследования может быть вопрос о геометрической систематизации конфигураций границ областей, а также рассмотрение сечений с большим количеством слоев неоднородности.

### **Список литературы**

1. Каландия, А. И. Замечания об особенностях упругих решений вблизи углов / А. И. Каландия // Прикладная математика и механика. – 1969. – Т. 33, №. 1. – С. 132–135.
2. Гринченко, В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. – К. : Наукова думка, 1981. – 284 с.
3. Вовк, Л. П. Анализ локальных особенностей волнового поля в сингулярных точках составной области / Л. П. Вовк // Вісник Сумського держ. ун-ту. Сер. Фізика, математика, механіка. – 2003. – № 10 (56). – С. 144–156.
4. Вовк, Л. П. Особенности локальной концентрации волнового поля на границе раздела упругих сред / Л. П. Вовк. – Донецк : Норд-Пресс, 2004. – С. 48.
5. Вовк, Л. П. Обзор основных методов решения краевых задач термоупругости / Л. П. Вовк, Е. С. Кисель. // Перспективы развития научных исследований в 21 веке : сб. материалов 9-й Междунар. науч.-практ. конф. (Махачкала, 31 окт. 2015 г.). – Махачкала : ООО «Апробация», 2015. – С. 8–9.
6. Вовк, Л. П. Асимптотический метод исследования краевых задач теории термоупругости в областях с негладкой границей : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. «Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике», 26 февраля 2010 г. / Л. П. Вовк, Е. С. Кисель. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2010. – С.4–6.
7. Леонтьев, Н. В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа / Н. В. Леонтьев. – Н. Новгород, 2006.
8. Иванов, В. Н. Словарь-справочник по литейному производству / В. Н. Иванов. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
9. Солнцев, Ю. П. Материаловедение : учеб. для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, Ф. Войткун. – М. : МИСИС, 1999. – 600 с.

*Л. П. Вовк, Е. С. Кисель*  
*Автомобильно-дорожный институт*  
**ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка**  
**Особенности динамического прочностного расчета деталей сложной конфигурации**

Проведено численное исследование зависимости краевых и граничных динамических эффектов от геометрических и упругих параметров, определяющих неоднородность детали; определение особенностей распределения термоупругих напряжений в зонах динамических эффектов на примере неоднородного термоупругого сечения детали сложной формы. Задачей программного анализа стало исследование общего НДС в особых зонах геометрической концентрации напряжений (особых точках и границах сечения) термоупругой однородной и неоднородной областей, его зависимость от геометрических параметров детали и общее исследование конструкции на прочность. В качестве модели детали конструкции рассматривалась стальная однородная деталь с однородным сечением и с сечением той же геометрии, но со сварным швом. В программном комплексе ANSYS был проведен модальный анализ с учетом преднапряженного состояния области. Результатом данного расчета стало вычисление значений первых собственных частот, визуализация соответствующих им форм, с учетом распределения термоупругих напряжений по площади сечения, что позволило судить о деформации рассмотренной области и участках локализации максимальных значений напряжений.

**НЕОДНОРОДНОСТЬ ДЕТАЛИ, ТЕРМОУПРУГАЯ ОБЛАСТЬ, ЛОКАЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ, ОСОБЫЕ ТОЧКИ СЕЧЕНИЯ ДЕТАЛИ, СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ**

*L. P. Vovk, Ye. S. Kisel*  
*Automobile and Highway Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka*  
**Dynamic Strengthening Analysis Peculiarities of the Parts of Irregular Shape**

A numerical study of the edge and boundary dynamic effects dependence on the geometric and elastic parameters determining the part heterogeneity is carried out; peculiarities of thermoelastic stress distribution in zones of the dynamic effect on the example of the inhomogeneous thermoelastic complex part section are defined. The aim of the programmed analysis was the study of the general deflected mode in special stress concentration zones (specific points and section boundaries) of thermoelastic homogeneous and heterogeneous fields, its dependence on the part geometric parameters and general test of the construction on strength. As the construction part model steel homogeneous part with a uniform section and with a section of the same geometry, but with the weld joint is considered. In the software package ANSYS the modal analysis was carried out taking into account the field prestressed state. The result of this calculation was the value calculation of the first proper frequencies, visualization of their corresponding forms taking into account thermoelastic stress distribution on the sectional area. It allowed to examine the deformation of the considered field and localization areas of stress maximum values.

**THERMOELASTIC FIELD, LOCAL STRESS CONCENTRATION, DEFLECTED MODE, STRENGTH CALCULATION, SPECIFIC POINTS, PART SECTION, PROPER FREQUENCES**

**Сведения об авторах:**

**Л. П. Вовк**

SPIN-код: 9860-6682  
 Телефон: +38 (095) 382-58-93  
 Эл. почта: lv777@list.ru

**Е. С. Кисель**

SPIN-код: 7676-8943  
 Телефон: +38 (093) 136-72-36  
 Эл. почта: e.s.kisel@gmail.com

*Статья поступила 25.02.2016*

© Л. П. Вовк, Е. С. Кисель, 2017

*Рецензент: Е. П. Мельникова, д-р техн. наук, проф., АДИ ГОУВПО «ДонНТУ»*