

- plications // IEEE Trans Instrum Meas 1992; 41: 64.
13. Newnham RE, Fernandez JF, Markowski KA, Fielding JT, Dogan A, Wallis J. Composite piezoelectric sensors and actuators // Mater Res Soc Proc 1995; 360: 33.
14. Sidorov O.V., Schetinin A.M., Frenkel G.G. New Sensor Composites based on aromatic polyamide // Thesis of 13TH international conference on composite materials, Beijing China, June 25 – 29, 2001.
15. Сидоров О.В. Ориентационное упорядочение в композитной пленке в процессе осаждения из раствора // Международный симпозиум ОМА-2003, г. Ростов, ИФ РГГУ, 2003.
16. Платонова И.В., Сидоров О.В., Тараскин С.А. Пьезоэлектрические свойства пленок полимерных композитов с сегнетоэлектрическим наполнителем // Сб. трудов 7-го международного симпозиума ОДРО-2004 - Ростов н/Д: ИФ РГГУ, 2004, с. 61-62.

### **К вопросу об особенностях проектирования и моделирования сварных конструкций корпусных деталей станков**

к.т.н. проф. Михайлов В.А., Порхунов С.Г.  
МГТУ «МАМИ»  
+7-495-223-05-23 доб. 1327

*Ключевые слова:* корпусные детали, сварные конструкции, метод конечных суперэлементов, виброустойчивость, деформация.

Корпусные детали в станках являются наиболее сложными по своей конфигурации, трудоемкими при изготовлении. Поэтому основная задача заключается в разработке метода определения показателей статического и динамического качества корпусных деталей с учетом сварных соединений.

По сравнению с другими типами неразъемных соединений сварные соединения в настоящее время являются наиболее распространенными в современных условиях производства станков - это объясняется тем, что они наиболее технологичные и экономичные. Традиционные методы расчета и проектирования сварного соединения зависят от типа соединения, способа сварки и вида шва [6]. Кроме общих предположений, характерных для расчета напряженно-деформированного состояния, при построении моделей сварных соединений для выполнения приближенных инженерных расчетов делаются некоторые дополнительные допущения, свойственные именно этому типу соединений: свариваемые детали и швы являются деформируемыми; не учитываются концентрации напряжений, наличие которых характерно для мест резкого изменения формы, а расчет выполняется только по номинальным напряжениям; материал шва считается однородным и изотропным; деформации считаются малыми и пропорциональными напряжениям.

Таким образом, решение поставленной задачи является достаточно сложным и требует серьезных исследований.

В качестве основного метода для определения статических и динамических показателей качества конструкции выбран метод конечных элементов в форме метода суперэлементов [5].

Рассмотрим алгоритм метода суперэлементов. Пусть рассчитываемая конструкция разделена на несколько частей - подструктур, каждая из которых в свою очередь состоит из базисных конечных элементов. Условия равновесия подструктуры выражаются системой алгебраических уравнений:

$$[\bar{K}]\{\bar{q}\} = \{\bar{P}\},$$

где:  $[\bar{K}]$  - общая матрица жесткости подструктуры;

$\{\bar{q}\}$  - вектор узловых перемещений;

$\{\bar{P}\}$  - вектор узловых усилий, действующих на подструктуру.

При соответствующем разделении перемещений подструктуры на внутренние  $i$  и граничные  $s$  матричное уравнение можно представить в блочном виде:

$$\begin{bmatrix} \bar{K}_{ii} & \bar{K}_{is} \\ \bar{K}_{si} & \bar{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{q}_i \\ \bar{q}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{P}_i \\ \bar{P}_s \end{Bmatrix}$$

Исключая из этой зависимости вектор внутренних перемещений подструктуры, можно получить:

$$[\bar{K}_{ss} - \bar{K}_{si} \bar{K}_{ii}^{-1} \bar{K}_{is}] \{\bar{q}_s\} = \{\bar{P}_s - \bar{K}_{si} \bar{K}_{ii}^{-1} \bar{P}_i\}$$

или

$$[\bar{K}^*] \{\bar{q}_s\} = \{\bar{P}^*\},$$

где:  $[\bar{K}^*] = [\bar{K}_{ss} - \bar{K}_{si} \bar{K}_{ii}^{-1} \bar{K}_{is}]$  – матрица граничных жесткостей подструктуры;

$\{\bar{P}^*\} = \{\bar{P}_s - \bar{K}_{si} \bar{K}_{ii}^{-1} \bar{P}_i\}$  – вектор граничных узловых усилий подструктуры.

Подструктуру, для которой определены матрицы  $[\bar{K}^*]$  и  $\{\bar{P}^*\}$ , будем называть суперэлементом, являющимся как бы математической моделью взаимодействия рассматриваемой подструктуры со смежными подструктурами конструкции. В такой постановке из суперэлементов как из базисных конечных элементов можно сформировать подструктуру высшего уровня, а затем, исключив внутренние для этой подструктуры перемещения, получить суперэлемент. Система уравнений равновесия всей конструкции в этом случае будет иметь небольшое число неизвестных, равное числу граничных перемещений суперэлементов предыдущего уровня. Если найдены граничные перемещения для суперэлемента некоторого уровня, его внутренние перемещения определяются из известного уравнения по следующей зависимости:

$$\{\bar{q}_i\} = [\bar{K}_{ii}^{-1}] \{\bar{P}_i\} - [\bar{K}_{ii}^{-1} \bar{K}_{is}] \{\bar{q}_s\}$$

После отыскания полного вектора перемещений для всех суперэлементов первого уровня с помощью обычной процедуры МКЭ вычисляются компоненты напряженного состояния базисных элементов [1].

Для расчета сварных корпусных деталей применялась система ANSYS. Будем рассматривать моделирование сверху - вниз: построение геометрической модели; задание свойств материала и типа конечных элементов; разбиение модели на конечные элементы; сохранение проекта модели; создание нового проекта; загрузка данных о модели в новый проект; задание свойств суперэлемента; выбор конечных элементов, образующих суперэлемент; выбор основных степеней свободы; приложение нагрузок и закреплений к подструктуре; запуск решателя для генерации матрицы жесткости суперэлемента. После работы решателя, создается файл суперэлемента.

Стоит отметить, что при создании множества суперэлементов необходимо повторять для каждого создаваемого суперэлемента эту процедуру. Для упрощения работы с суперэлементами разработана Система Автоматизированной Генерации и Расчета Суперэлементов (САГиРС). Система представляет собой набор кнопок в панели инструментов, сгруппированных в функциональные подблоки. Общий вид системы автоматизированной генерации и расчета суперэлементов представлен на рисунке 1 [7].

Действия, выполняемые пользователем при работе с САГиРС, приведены на рисунке 2. На этапе создания происходит конденсация группы стандартных КЭ в один суперэлемент. Конденсация происходит путем определения набора основных степеней свободы, которые, в основном, служат для определения связей с остальной моделью. Для использования суперэлемента необходимо сделать созданный суперэлемент частью модели. Остальная модель может состоять из суперэлементов или стандартных КЭ. Решение, полученное на этапе ис-

## Раздел 2. Технология машиностроения и материалы.

пользования, представляет собой сокращенное решение для суперэлементов и полное решение для стандартных КЭ. На этапе развертки производится работа с сокращенным решением, полученным для суперэлемента. На основе этого решения находится решение внутри суперэлемента. Если в задаче используется несколько суперэлементов, то для каждого из них необходимо осуществлять развертку [4].

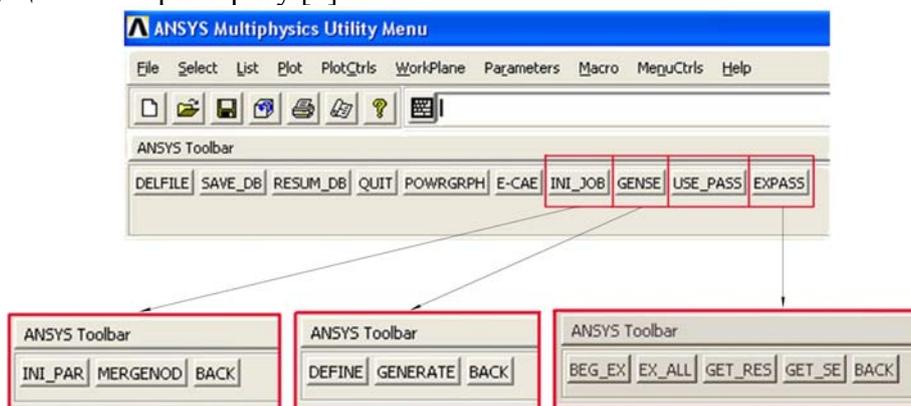


Рисунок 1 - Общий вид САГиРС

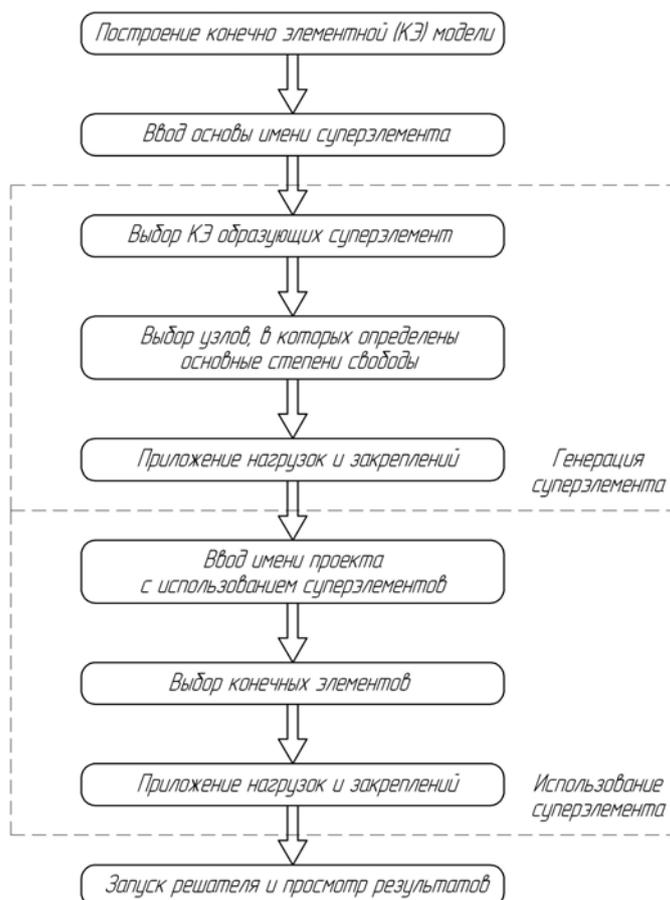


Рисунок 2 - Схема этапов работы с САГиРС

Для проверки адекватности разработанной методики определения параметров качества сварных базовых корпусных деталей металлорежущих станков были изготовлены сварные образцы-модули и аналогичные образцы без сварных швов. В данных образцах использовались сварные швы, которые чаще всего присутствуют в сварных базовых корпусных деталях металлорежущих станков. Материал свариваемых и цельнометаллических образцов сталь 3пс ГОСТ 380-71. Марка сварочной проволоки СВ-08ГА по ГОСТ 2246-71. Марка флюса

ОСЦ-45 по ГОСТ 9087-75 [3]. На рисунке 3 приведены экспериментальные образцы – модули.

На рисунке 4 представлены стенды для исследования деформации и собственных частот образцов. Измерение деформации образцов производилось с помощью индикатора при нагружении с помощью динамометра. Для измерения собственных колебаний образцов применялась виброизмерительная система, состоящая из модуля АЦП/ЦАП/ТЛЛ мод. Е14-440 фирмы L-CARD, одноканального усилителя LP-03 фирмы L-CARD, вибропреобразователя AP97 фирмы ГлобалТест. Возбуждение исследуемого объекта выполнялось с помощью ударного молотка мод. AU01.



**Рисунок 3 - Сварные и цельнометаллические модули - образцы**



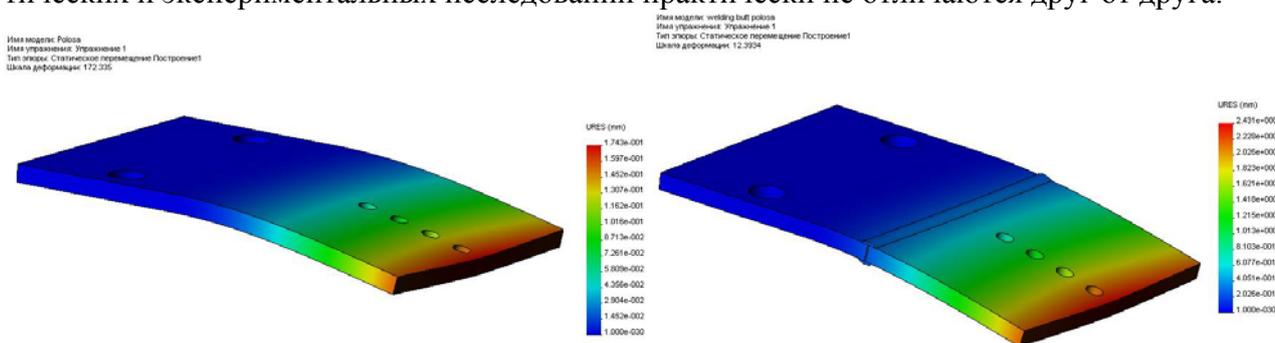
**Рисунок 4 - Стенды для исследования модулей – образцов**

В соответствии с принятой методикой исследований, выполнено изучение перемеще-

## Раздел 2. Технология машиностроения и материалы.

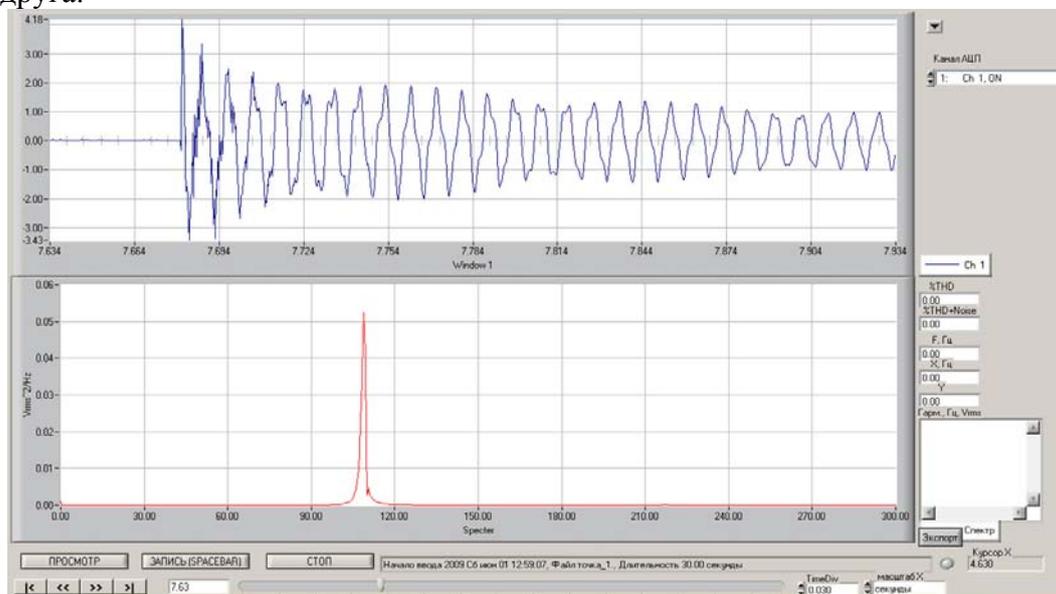
ний от нагрузки для образцов-модулей со стыковым сварным швом и цельнометаллических образцов. Результаты приведены на рисунке 5.

Для сравнения опытных данных с данными моделирования для образца без сварного шва под нагрузкой 1500 Н воспользуемся статистическим анализом, в ходе которого было выявлено, что расчётное значение критерия Стьюдента  $t = 1,66$ . Предельное значение  $t$  для критической области  $t_{кр} = 2,262$  (для  $\nu = 9$ , уровень значимости 0,95). Расчётное значение критерия Стьюдента  $t = 1,66$ . Так как  $t_{кр} > t$ , то нулевая гипотеза принимается, т.е. средние значения генеральной совокупности попарно совпадают, и, следовательно, результаты теоретических и экспериментальных исследований практически не отличаются друг от друга.



**Рисунок 5 - Перемещения, возникающие в образце без сварного шва и со стыковым сварным швом под нагрузкой в 1500Н**

Выполним сравнение расчетных и опытных данных для образца со стыковым сварным швом под нагрузкой в 1500Н. Из результатов расчетов имеем  $A_{ср} = 0,0560$ ;  $S_2 = 0,05560$ . Расчётное значение критерия Стьюдента  $t = 0,75$ . Так как  $t_{кр} > t$ , то нулевая гипотеза принимается, т.е. средние значения генеральной совокупности попарно совпадают, и, следовательно, результаты теоретических и экспериментальных исследований практически не отличаются друг от друга.

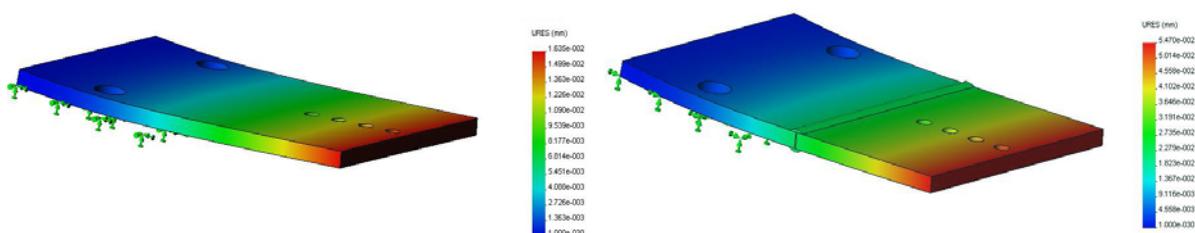


**Рисунок 6 - Виброграмма и спектр собственных частот, возникающих в образце со стыковым сварным швом в плоскости X**

Исследование частоты собственных колебаний и обработка данных для модулей - образцов выполнено по аналогии с рассмотренной ранее схемой. Виброграмма и спектр собственных частот, возникающих в образце со стыковым сварным швом в плоскости X, представлены на рисунке 6. Результаты исследований представлены на рисунке 7.

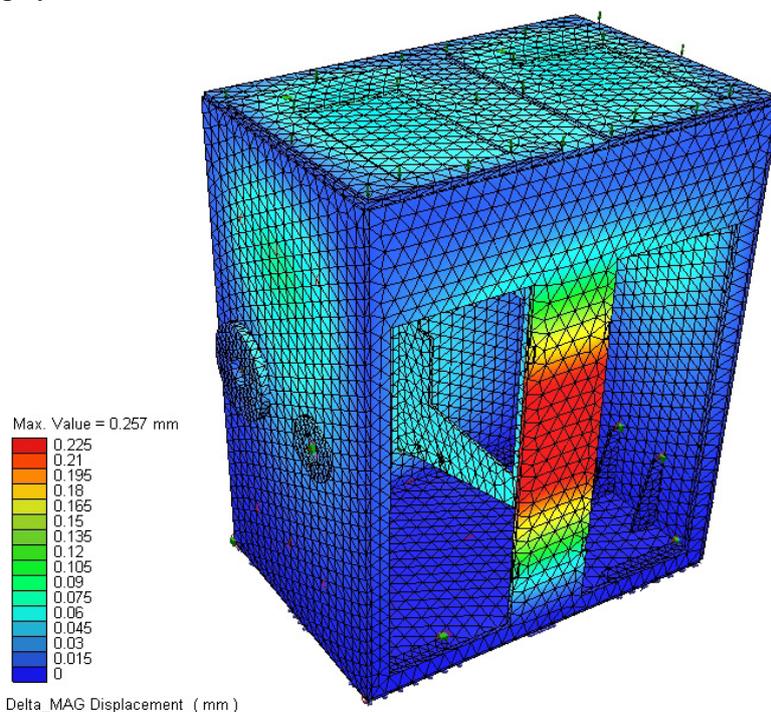
Имя модели: Рабова  
Имя уравнения: Уравнение 2  
Тип эскиза: Частотный Построитель  
Формы элементов: 1. Элементы = 116.11 Гц  
Шаг деформации: 0.025279

Имя модели: ивсвгт.йф.робова  
Имя уравнения: Уравнение 2  
Тип эскиза: Частотный Построитель  
Формы элементов: 1. Элементы = 109.65 Гц  
Шаг деформации: 0.025279



**Рисунок 7 - Перемещения, возникающие в образцах без сварного шва и со стыковым сварным швом, на первой частоте собственных колебаний**

В качестве объекта исследований был выбран корпус, на котором установлены две вертикальные стойки, которые служат для базирования силовых столов с закрепленными на них шпиндельными бабками. При сварке корпуса использовались только тавровые и нахлестовые сварные швы. Материал свариваемых листов - Сталь 3пс. Для определения деформированного состояния корпуса был использован МКСЭ. Нагрузка прикладывалась к верхним плиткам и составляла 20кН. На рисунке 8 показана диаграмма значения полных перемещений, возникающих в корпусе.



**Рисунок 8 - Перемещения, возникающие в корпусе от действия приложенных сил**

Статистический анализ проведенный для корпуса позволил установить, что  $t_{кр} > t$ . Из этого следует, что нулевая гипотеза принимается, и, следовательно, результаты теоретических и экспериментальных исследований практически не отличаются друг от друга.

Работа выполнена в рамках проведения НИР при реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 г.г.

### Выводы

На основании результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Статистический анализ данных моделирования и опытных данных показал адекватность применяемого метода расчета реальным процессам в модулях – образцах.

2. Применение метода конечных элементов в форме метода суперэлементов для расчета сварных базовых конструкций металлорежущих станков является мощным средством обес-

печения максимальной точности решения сложных задач при минимальных затратах ресурсов вычислительной техники.

3. При моделировании технологической системы со сварными корпусными деталями нецелесообразно их аппроксимировать конструкциями без сварных швов, так как это приводит к существенным ошибкам.

#### Литература

1. Галанин М.П., Савенков Е.Б. Совместное использование метода конечных элементов и метода конечных суперэлементов. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2004. № 13. 34 с.
2. Кирилин Ю.В. и др. Сварная стойка для тяжелого вертикально-фрезерного станка. - «Станки и инструмент», 1980, № 2.
3. Мазур А.А. Конструкционные материалы для сварных станин металлорежущих станков. - Науч.-техн. сб. «Технология производства. НОТ и У». М., НИИмаш, 1979, № 5.
4. Михайлов В.А., Порхунов С.Г. Расчет напряженно-деформированного состояния сварных базовых конструкций металлорежущих станков методом конечных суперэлементов. // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара, Самарский научный центр, специальный выпуск «Актуальные проблемы машиностроения», 2009, - с. 203-206.
5. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. - М., Высшая школа, 1985.
6. Черкасская Л.П., Финкель Л.М. Сварные базовые детали станков и машин. Обзор. М., НИИмаш, 1981.
7. Kohnke P. ANSYS Theory Reference, Eleventh Edition. ANSYS, Inc., 1999.

#### **Определение характеристик режущего инструмента методом конечных элементов**

к.т.н. проф. Михайлов В.А., к.т.н. доц. Иванников С.Н., Мокринская А.Ю.  
МГТУ «МАМИ»  
+7-495-223-05-23 (\*) 14-51

*Ключевые слова:* математическая модель; метод конечных элементов.

Широкое применение высокоскоростной обработки требует применения режущего инструмента, имеющего принципиально новые показатели статического и динамического качества и параметрической надежности. Следовательно, проблема совершенствования методов определения параметров инструмента является актуальной и имеет практическое значение. Многие используемые для изготовления инструментов материалы состоят из чередующихся объемов веществ с различными свойствами. К таким материалам можно отнести твердые сплавы на основе WC-Co и WC-TiC-Co. Свойства этих сплавов зависят от состава, размеров карбидных зерен и температуры испытаний. Особенно велики различия между сплавами WC-Co и WC-TiC-Co. Для объяснения этих различий недостаточно ссылки на разный состав карбидной и связующей фазы. Следует полагать, что основной причиной является различие в структуре этих групп сплавов. В сплавах WC-Co структура представляет собой в основном кобальтовую матрицу с вкрапленными в нее зернами или агрегатами карбида вольфрама. В трехфазных сплавах WC-TiC-Co зерна WC также окружены кобальтом, а зерна (Ti, W) C образуют или сплошной каркас или крупные объемные агрегаты, разьединенные кобальтом и зернами WC. В двухфазных сплавах до определенного содержания кобальта сплошной скелет из зерен (Ti, W) C. При этом характерные объемы однородного вещества много меньше размеров самой конструкции инструмента, но таковы, что внутри неоднородности поведение материала можно описывать уравнениями механики. В этом случае решают задачу следующим образом: определяют эффективные характеристики среды, например, эффективный модуль упругости и коэффициент Пуассона и сводят задачу к однородной среде, иногда к анизотропной. Определение эффективных характеристик осуществляют на основе простейших