

венной постановке делает ее громоздкой и растянутой во времени, а применение упрочненных плоских моделей требует соответствующего обоснования.

Аналогичной структурой обладают и другие типы технологической оснастки: универсальные сборочные приспособления, сборно-разборные приспособления для приварки крепежных элементов и др.

Метод и результаты исследования. Для обоснованного выбора *расчетной модели* сборки ПСРП-Т предложен гибкий комбинированный метод, предполагающий различные пути построения моделей для исследования прочностных и жесткостных характеристик ЭТО, в первую очередь элементов оснастки. Он состоит в комбинации расчетных и экспериментальных этапов.

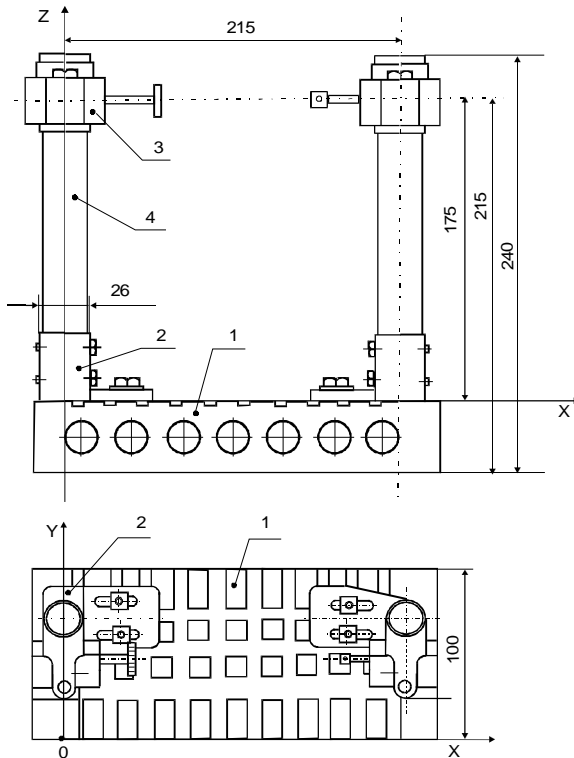


Рис. 1. Схема компоновки ПСРП-Т

Характерные особенности данного метода:

- *взаимозависимость* варьируемых параметров и контролируемых характеристик на расчетных и экспериментальных этапах и *совместный выбор* основных значимых факторов;

- *взаимовлияние* текущих результатов на изменение схемы дальнейших расчетов (экспериментов) и на выбор *определяющих параметров* создаваемой расчетной модели;

- *взаимоподтверждение типа расчетной модели и подтверждение адекватности* созданных моделей, в том числе *полноты модели*, т.е. отражение в модели *всех основных свойств* реальных объектов.

В результате комбинации различных этапов можно выделить следующие реализации предложенного подхода:

- “Э” – экспериментальный этап;
- “Э-Э” – сочетание экспериментальных этапов;
- “Р-Э” – сочетание расчетного и экспериментального этапов;
- “Р-Э-Р” – сочетание расчетных и экспериментального этапов;
- “Э-Р-Э-Р” – сочетание расчетных и экспериментальных этапов;
- “Р-Р-Р” – сочетание расчетных этапов.

В данном случае была использована схема “Р-Э”. Схема “Р-Э” эффективна, когда при построении расчетных моделей ЭТО процессы уточнения (подтверждения) ее *определяющих параметров* взаимно независимы (или когда этот параметр единственен). Например, при определении конструктивных параметров элементов комплекта переналаживаемых сборно-разборных приспособлений для сборки трубопроводов под сварку (ПСРП-Т) одной из основных задач является исследование напряженно-деформированного состояния базовых плит.

Базовые плиты ПСРП-Т имеют сложную систему пазов и отверстий, предназначенных для базирования и закрепления опорных стоек и других элементов компоновок, обеспечивающих сборку и сварку трубопроводов. При проведении данных операций температурные нагрузки, вызываемые пламенем горелки или сварочной дугой, приводят к деформациям элементов сборок, в том числе базовых плит. При этом во многих случаях схема компоновки позволяет предположить возникновение в базовых плитах напряженного состояния, близкого к плоскому. Правомерность данного предположения может быть оценена при сравнении результатов расчетов и лабораторных исследований одного из вариантов сборки ПСРП-Т методом голографической интерферометрии (рис. 2-3).

Усилие в компоновке (95 Н) моделировалось силовым винтом и контролировалось динамометром сжатия, расположенными между опорными стойками сборки. *Отличительные особенности деформированного состояния компоновки ПСРП-Т*, выявленные в процессе экспериментальных исследований:

- преобладающими перемещениями являются в данном случае перемещения в плоскости zx ;
- условия закрепления стоек обеспечивают совместное деформирование всех элементов сборки.

Соответствующие численные исследования с использованием плоской и

пространственной моделей показали аналогичный характер деформирования и совпадение величин перемещений (рис. 4-6). Погрешность в процессе расчетов не превышает 7%. Это подтверждает возможность применения в процессе дальнейших исследований для оперативного анализа НДС базовых плит ПСРП-Т конечно-элементных моделей плоского напряженного состояния. Это ускоряет проведение многвариантных расчетов на этапе предварительного выбора рациональных конструктивных схем и основных параметров плит ПСРП-Т.

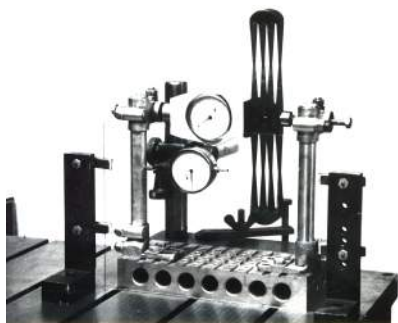


Рис. 2. Запись спекл-интерферограммы

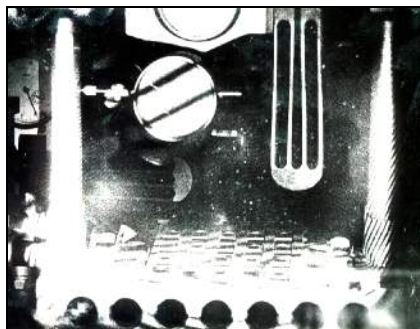


Рис. 3. Спекл-интерферограмма компоновки ПСРП-Т

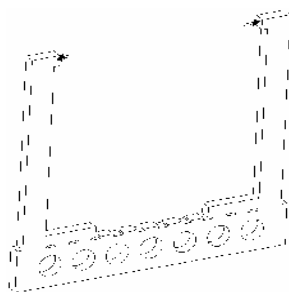


Рис. 4. Расчетная схема компоновки ПСРП-Т

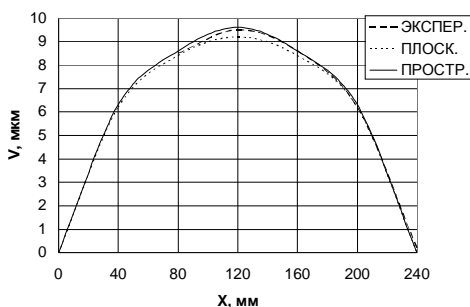


Рис. 5. Распределения прогибов плиты по результатам экспериментального и численного исследования сборки ПСРП-Т

Задача уточнения граничных условий. Задача уточнения граничных условий является очень важным этапом во всем комплексе построения достоверных расчетных моделей (или получения непосредственным образом конечного решения задачи анализа напряженно-деформированного состояния отдельного элемента или всей исследуемой механической системы).

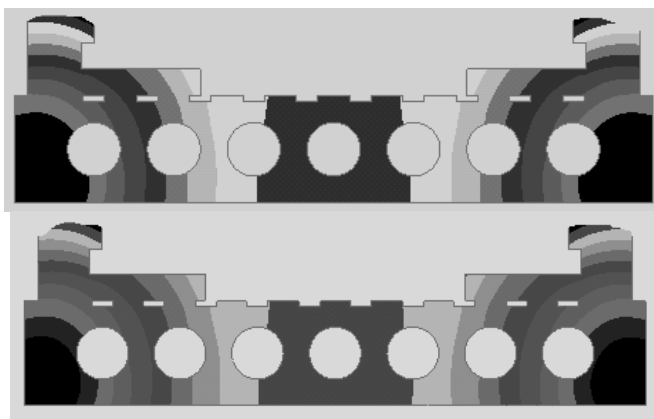


Рис. 6. Картины распределения перемещений по результатам исследования плоской и пространственной модели плиты ПСРП-Т

Структурно она содержит подзадачи:

I. Определение типа граничных условий, которые могут иметь вид:

а) классических двусторонних граничных условий на участках поверхности S_u^I :

$$l_u^I(u) = g, \quad x \in S_u^I, \quad (1)$$

где l_u – линейный дифференциальный оператор;

g – задаваемая функция;

б) двусторонних граничных условий сопряжения на участках поверхности S_u^{II} (например, неразъемные соединения сваркой, пайкой и т.д.) типа

$$u^{(*)} = u^{(**)}, \quad x \in S_u^{II}, \quad (2)$$

где индексы (*), (**) относятся к первому и второму из сопрягаемых тел;

в) односторонних ограничений, определяющих условия непроникновения одного тела в другое или исследуемого тела в жесткое ограничение:

$$u_v^{(*)} + u_v^{(**)} \leq \delta, \quad x \in S_u^{III}, \quad (3)$$

где δ - зазор в сопряжении тел по нормали к поверхности возможного контакта S_u^{III} .

II. Определение основных параметров:

а) области действия граничных условий (размеров и формы участков поверхности $S_u^I, S_u^{II}, S_u^{III}$);

б) задающих функций и параметров (g, δ и т.п.).

III. Определение границ применимости принятых граничных условий в зависимости от некоторых внешних и внутренних факторов (усилий смыкания, усилий предварительной затяжки крепежных элементов и т.д.).

IV. Определение чувствительности модели к погрешности определения граничных условий или к их изменению.

Методы уточнения граничных условий. Для решения задачи уточнения граничных условий применимы различные методы: расчетный, экспериментальный, а также на основе анализа опыта исследований аналогичных конструкций. Наиболее достоверная информация может быть получена экспериментальным путем, в частности, здесь могут быть использованы следующие приемы: применение специальных измерительных приборов (индикаторы перемещений, шупы и т.д.); применение специальных регистрирующих сред или устройств (прокладки, фиксирующие величину и область распределения контактных давлений, микротензодатчики, определяющие наличие (отсутствие) контакта и величину контактного усилия и т.д.); определение искомого вида граничных условий и его характеристик непосредственно в ходе экспериментов в качестве сопутствующей информации. В этом случае необходимая информация является одной из составляющих комплекса информационных данных, получаемых в ходе эксперимента для уточнения всех параметров модели.

Достоинства последнего из предложенных подходов: оперативность, простота, снижение затрат, отсутствие погрешностей, обусловленных различием условий при проведении различных экспериментов. В частности, без существенных изменений, добавлений и усложнений данный способ может быть реализован в рамках технологии спекл-голографической интерферометрии [6].

Примеры применения предложенного подхода для уточнения граничных условий. Использование предложенной технологии уточнения граничных условий может быть проиллюстрировано на примерах исследования элементов технологических систем. В частности, одной из важных проблем в области проектирования элементов технологической оснастки является обоснованный выбор способов ее крепления и базирования. Действительно, при наличии большого количества стыков именно перемещения в сопряжениях ЭТО могут оказывать существенное влияние на баланс перемещений в технологической системе. В то же время расчетное определение жесткости сопряжений во многих случаях затруднено в силу большого количества трудноучитываемых факторов. В связи с этим решающее значение приобретают экспериментальные исследования типовых схем сопряжения. В частности, представляет интерес определение жесткости в сопряжениях сборок универсально-сборных приспособлений (УСП). Та или иная конструктивная реализация сопряжений в универсальных сборных приспособлениях оказывает, в конечном счете, влияние на точность базирования и обработки деталей на металлорежущих станках.

В качестве примера в соответствии с методикой спекл-голографических измерений были проведены исследования двух компоновок, показанных на рис.7, 8.

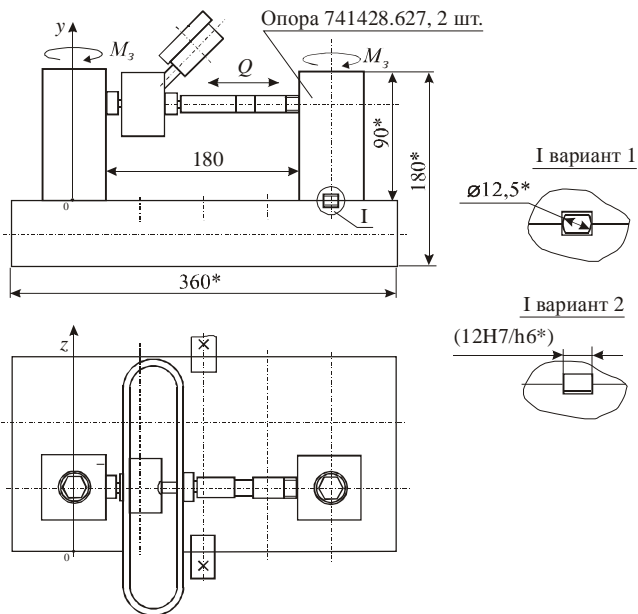


Рис. 7. Компоновка УСП (вариант I)

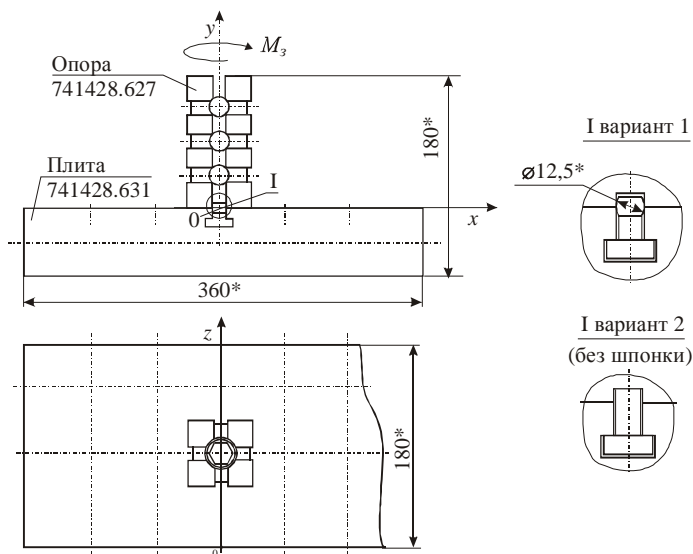


Рис. 8. Компоновка УСП (вариант II)

Первая компоновка состоит из базовой плиты и опорного элемента, закрепленного на ней с помощью болтового соединения. Компоновка была выполнена в двух вариантах: с фиксацией опоры цилиндрической шпонкой (рис. 9) и с фиксацией опоры обычной призматической шпонкой (рис. 10).

Голографическое исследование двух указанных вариантов были проведены при перепаде моментов затяжки $\Delta M_z = 100 \text{ Нм} - 10 \text{ Нм}$. На рис. 11, 12 представлены голографические интерферограммы, характеризующие геометрические изменения, произошедшие с компоновками в процессе затяжки. Голографирование проводилось при освещении объекта вдоль оси z .

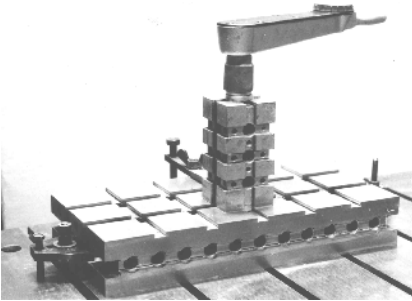


Рис. 9. Компоновка УСП с фиксацией опоры цилиндрической шпонкой

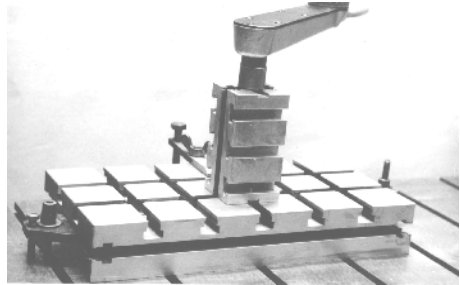


Рис. 10. Компоновка УСП с фиксацией опоры обычной призматической шпонкой

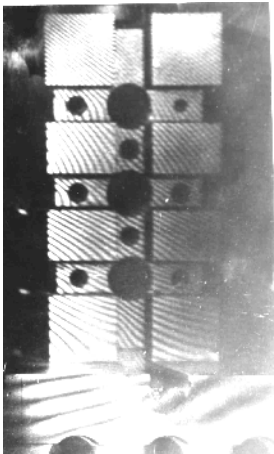


Рис. 11. Голографическая интерферограмма компоновки с фиксацией опоры цилиндрической шпонкой (вид сбоку)

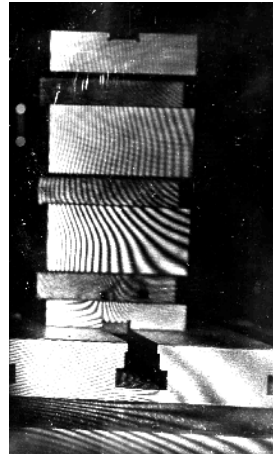


Рис. 12. Голографическая интерферограмма компоновки с фиксацией опоры обычной призматической шпонкой (вид сбоку)

По голографическим интерферограммам, представленным на рис. 11–14, построены графические зависимости (рис. 15–16) перемещений точек поверхности компоновок, показанных на рис. 9–10, вдоль осей x и y . На графических зависимостях введены обозначения $x_{цил}$, $y_{цил}$ и $x_{пр}$, $y_{пр}$ - координаты точек на компоновках с фиксацией опор цилиндрической шпонкой и с фиксацией призматической шпонкой соответственно.

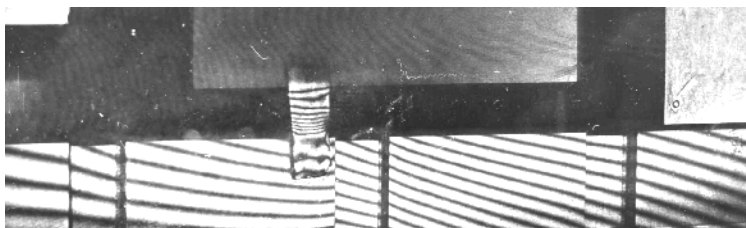


Рис. 13. Голографическая интерферограмма базовой плиты при перепаде моментов затяжки $\Delta M_3 = 100 \text{ Нм} - 10 \text{ Нм}$ с фиксацией опоры цилиндрической шпонкой

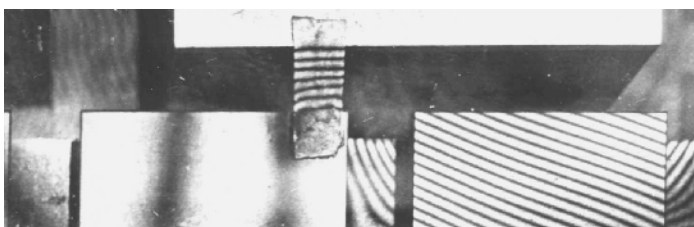


Рис. 14. Голографическая интерферограмма базовой плиты при перепаде моментов затяжки $\Delta M_3 = 100 \text{ Нм} - 10 \text{ Нм}$ с фиксацией опоры обычной призматической шпонкой

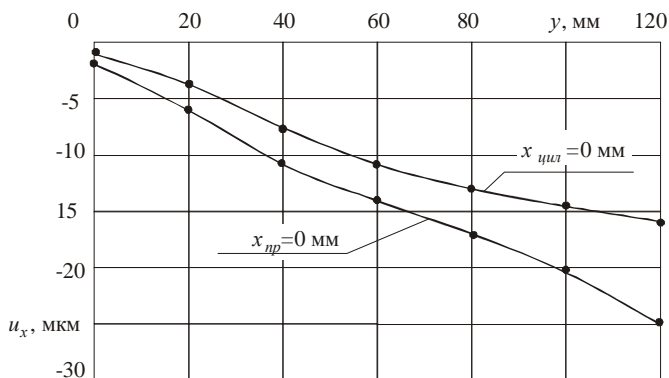


Рис. 15. Графические зависимости перемещений точек поверхности

компоновок рис. 9 и рис. 10 вдоль оси x

Вторая компоновка состоит из базовой плиты и двух опорных элементов, закрепленных с помощью болтового соединения моментом затяжки 150 Н. Исследуемый опорный элемент фиксируется в одном варианте цилиндрической шпонкой (рис. 17), в другом – обычной призматической (рис. 18). Внешней нагрузкой служит распирающая сила Q .

Голографические исследования этих двух вариантов были проведены при перепаде распирающего усилия

$$\Delta P = (7,5 \text{ кН} - 6,3 \text{ кН}) = 1,2 \text{ кН}$$

(рис.17, 18). По голографическим интерферограммам построены графические зависимости (рис. 19, 20) перемещений точек поверхности компоновок, показанных на рис.21, 22, вдоль осей x и y соответственно.

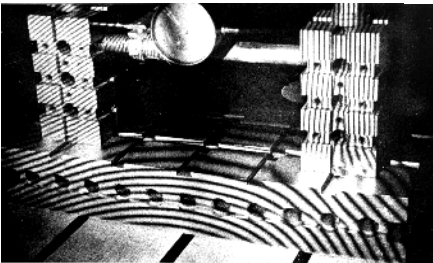


Рис. 17. Голографическая интерферограмма компоновки с фиксацией опор цилиндрическими шпонками при перепаде усилия 1,2 кН

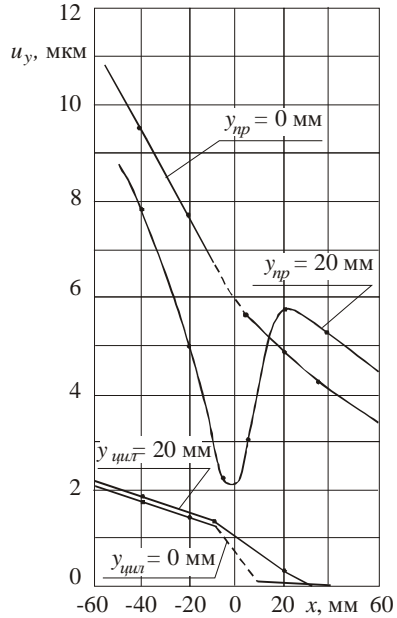


Рис. 16. Графические зависимости перемещений точек поверхности компоновок рис.9 и 10 вдоль оси y

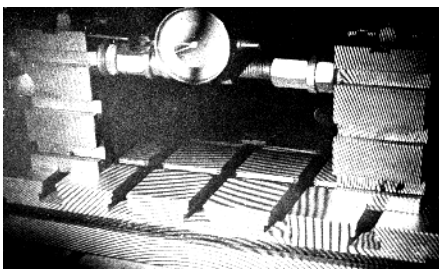


Рис. 18. Голографическая интерферограмма компоновки с фиксацией опор обычными призматическими шпонками при перепаде усилия 1,2 кН

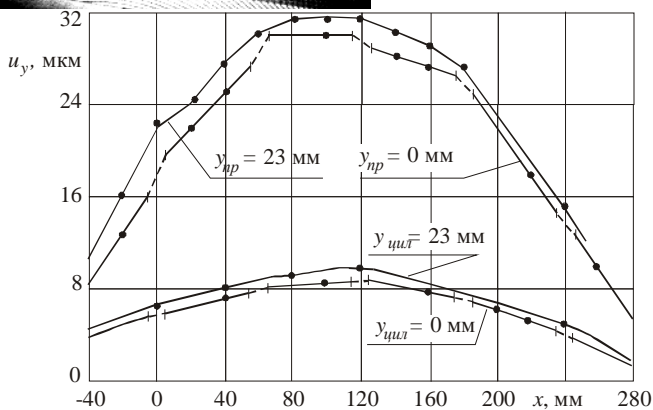


Рис. 19. Графические зависимости перемещений точек базовых плит компоновок рис. 9 и рис. 10 вдоль оси x

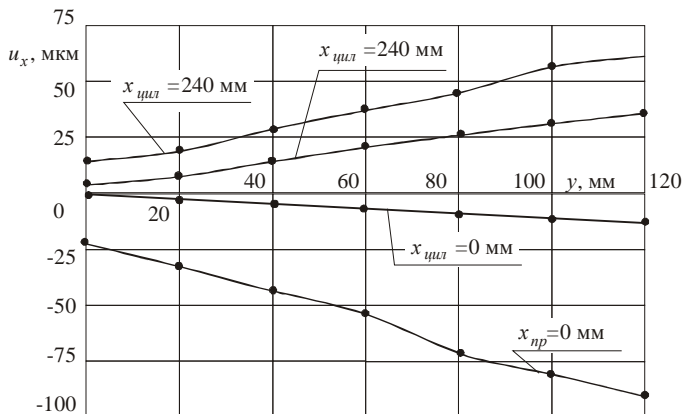


Рис. 20. Графические зависимости перемещений точек поверхности компоновок рис. 9 и рис. 10 вдоль оси x

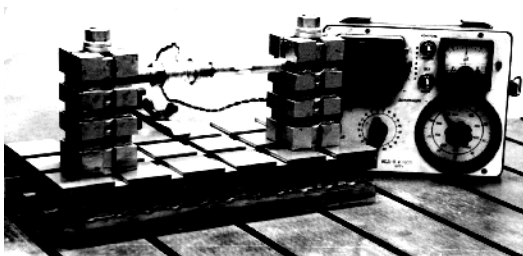


Рис. 21. Компонетка, состоящая из базовой плиты и двух опорных элементов с фиксацией опор цилиндрическими шпонками

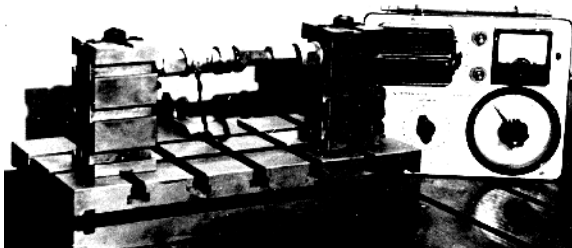


Рис. 22. Компонетка, двух опорных элементов с фиксацией опор призматическими шпонками

В результате выполнения спекл-голографических исследований компоновок универсально-сборочных приспособлений было показано, что:

1. Диапазон величин измеряемых перемещений любых точек, лежащих на поверхности конструкции, составляет $0,5 \div 100$ мкм.

2. Величины перемещений точек, лежащих на поверхности исследуемых компоновок, имеют практически линейную зависимость от величины момента затяжки в интервале 0-15 кгм для компоновок, показанных на рис.9, 10, и от величины распирающего усилия в интервале $0 \div 2,0$ кН для компоновок, показанных на рис. 21, 22. Это было проверено для выбранных точек с помощью микрометрических индикаторов часового типа, и подтверждено голографическими исследованиями.

3. Максимальные перемещения верхней части опоры при перепаде момента затяжки от $0 \div 100$ Нм составляют 24 мкм для опоры с фиксацией призматическими шпонками и 16 мкм для опоры с фиксацией цилиндрическими шпонками.

4. Максимальные перемещения верхней части опоры при перепаде распирающего усилия $\Delta P = 7,50$ кН-6,3 кН=1,20 кН составляют 90 мкм для опоры с фиксацией призматическими шпонками и 30 мкм для опоры с фиксацией цилиндрическими шпонками.

5. Максимальные прогибы базовых плит при перепаде распирающего усилия $\Delta P = 7,50$ кН-6,3 кН=1,20 кН составляют 32 мкм для опоры с фиксацией призматическими шпонками и 10 мкм для опоры с фиксацией

цилиндрическими шпонками.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что при фиксации опор цилиндрическими шпонками жесткость компоновок в 2-3 раза больше, чем при фиксации компоновок обычными призматическими шпонками. Оба вида рассмотренных компоновок работоспособны в широком диапазоне прикладываемых нагрузок, обеспечивая при этом необходимую жесткость собираемых конструкций. Проведенные исследования позволяют вычислять жесткость сборок как функцию того или иного конструктивного решения и вида организации сопряжения призма-плита.

Отдельным вопросом при этом является характер условий сопряжения по границам призма-плита и плита-основание (см. рис. 11-14). Несовпадение картин полос в этих сопряжениях свидетельствует об их относительном смещении, а наклейка резиновых „мостиков” позволяет количественно оценить данные смещения.

Общие характеристики предложенного подхода. В процессе исследований с использованием предложенного подхода уточнения граничных условий могут быть выявлены как количественные характеристики, так и качественные особенности расчетных схем, граничных условий и условий сопряжения. Качественные выводы могут быть сделаны уже на этапе визуального экспресс-анализа. Количественная оценка может быть осуществлена после расшифровки картин распределения перемещений. Дополнительную информацию обеспечивает применение индикаторов перемещений и „мостиков” из низко модульного материала, „построенных” между деформируемой поверхностью и другой, перемещения которой известны (чаще всего это неподвижная поверхность). Общая схема предложенной технологии может быть изображена в виде последовательности экспериментальных исследований и этапов расшифровки (рис. 23).



Рис. 23. Схема экспериментального уточнения граничных условий

Основным недостатком метода является невозможность заранее предсказать объем необходимых исследований, в том числе дорогостоящих экспериментальных этапов.

Заключение. Предложенный метод позволяет провести комплексное решение построения достоверных, полных и рациональных расчетных моделей для исследования влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров на прочностные и жесткостные характеристики исследуемых деталей и узлов.

Качественный анализ результатов комплекса проведенных исследований различных процессов на различных приспособлениях дает возможность сделать следующие выводы.

1. Существенным фактором обеспечения точности обработки является организация усилий замыкания в подсистемах технологической системы. При этом важно, чтобы данные усилия превышали технологические усилия при резании, литье, штамповке или других операциях.

2. Процесс измерений на конкретных приспособлениях дает возможность получать не только качественные результаты, но и количественные характеристики для определения расчетных схем.

3. Варьирование конструктивных решений элементов технологической оснастки, технологических и конструктивных параметров позволяет определить границу области допустимых решений при проектировании приспособлений. Пробное варьирование, выполненное в окрестности некоторой точки из области допустимых решений с разбросом варьируемых параметров при проведении экспериментальных исследований наряду с количественными значениями возмущающих воздействий позволяет сделать обоснованный вывод о приемлемости тех или иных типов расчетных схем при проведении численных исследований элементов технологической оснастки.

Полученные качественные и количественные характеристики реальных конструкций служат основой для построения достоверных расчетных моделей элементов сложных механических систем, в частности, элементов технологических систем. В дальнейших исследованиях описанную технологию можно распространить и на другие типы исследуемых объектов.

Список литературы: 1. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 2. *Ткачук Н.А., Орлов Е.А., Липовецкий Л.С., Малакей А.Н.* К вопросу расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.– № 47. –С.162-172. 3. *Гоголь Н.А., Назарова О.В., Ткачук А.В., Кохановская О.В. Веретельник Ю.В.* К задаче формирования расчетных элементов технологических систем листовой штамповки // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.– № 47. –С. 50-60. 4. *Веретельник Ю.В.* Моделирование свойств материалов биомеханических систем: модели, подходы, численный эксперимент // Вісник

Национального технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.– № 47. – С. 29-35.

5. *Мартынченко А.В., Ткачук А.В., Зарубина А.А., Васильев А.Ю.* Расчетно-экспериментальное исследование элементов гидрообъемных передач // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.– № 47. –С.99-106.

6. *Капустин А.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ – 1999.– вып.53.– С.148-155.

Поступила в редколлегию 12.11.2005

УДК 623.5: 623.438

***О.Е. ШАТАЛОВ, А.Ю. ЛАРИН, ХИТВ, А.Ю. ВАСИЛЬЕВ,
А.В. МАРТЫНЕНКО, А.Н. ТКАЧУК, А.В. ГРАБОВСКИЙ, НТУ “ХПИ”***

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТАКТИЧЕСКИХ ДИАГРАММ С УЧЕТОМ ДВИЖЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОРПУСА БРОНИРОВАННОЙ МАШИНЫ В ПРОСТРАНСТВЕ

У роботі описується математична модель яка використовується для створення методу оцінки рівня захищеності легкоброньованих машин за допомогою побудови 3D тактичних діаграм.

This work describes mathematical model used for creation of 3D tactical diagrams protection level estimation method of light weight armored vehicles.

Введение. В настоящее время в мире прослеживается тенденция роста количества вооруженных конфликтов, в которых страны–участницы используют регулярные войска. Неотъемлемой составной частью вооружения и военной техники группировок войск, обеспечивающих реализацию планов противоборствующих сторон, являются боевые машины легкой категории по массе (БМ ЛКМ): боевые машины пехоты (БМП) и бронетранспортеры (БТР). Анализ современных вооруженных конфликтов (в том числе обобщение опыта борьбы с терроризмом) свидетельствует о том, что в связи с развитием тактики и при использовании нетрадиционных способов применения частей и соединений расширяется спектр задач, выполняемых боевыми машинами ЛКМ [1]. Отсутствие четко выраженной линии столкновения конфликтующих сторон предопределяет перераспределение снарядной нагрузки по всему корпусу, а также по крыше боевой машины [1, 2]. Такое состояние дел требует пересмотра подходов к оценке броневой защиты от действия средств поражения.

При создании метода оценки защищенности ЛБМ необходимо исходить из положения, что все пространство, окружающее бронелист, можно разделить на две зоны: зону, в которой существует опасность пробития брони

определенным боеприпасом, и безопасную зону. Опасная зона всей машины является совокупностью опасных зон бронелистов. Соответственно возникает необходимость математического описания трехмерной поверхности, которая соответствует границе между опасной и безопасной зонами. Также необходимо было разработать математический аппарат для обеспечения возможности дальнейшего всестороннего анализа указанной трехмерной поверхности для выдачи рекомендаций. Актуальность создания математической модели обусловлена рядом преимуществ, которыми обладает трехмерная тактическая диаграмма по сравнению с традиционным методом оценки бронезащищенности с помощью тактических диаграмм, описанным в