

В. С. ЖЕРНАКОВ, А. Н. ЕРМОЛЕНКО, Р. М. САБИРОВ

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЗАКЛЁПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассмотрены процессы разрушения в сложных пространственных конструкциях типа одиночных и групповых заклёпочных соединений элементов летательного аппарата и газотурбинных двигателей, подверженных действию механических и термических нагрузок, а также при наличии произвольно расположенных дефектов типа трещин. Экспериментальное определение деформаций; *Vis3D*; математическое моделирование; *трещиностойкость*

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения анализа процессов разрушения в сложных пространственных конструкциях типа одиночных и групповых заклёпочных соединений элементов летательного аппарата и газотурбинных двигателей, подверженных действию механических и термических нагрузок, а также при наличии произвольно расположенных дефектов типа трещин отдаётся предпочтение численным методам расчёта.

Одним из наиболее эффективных и хорошо себя зарекомендовавших методов оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС), который позволяет выполнять сложные расчеты с учётом различных граничных условий, является метод конечных элементов (МКЭ), а также оптические методы измерения деформаций.

Несмотря на практическую важность, вопросы исследования скорости роста трещины, в зависимости от вида напряжённого состояния и от величины натяга при установке заклёпки в отверстие заклёпочного соединения, являются недостаточно изученными, тем не менее, случаи разрушения и выхода из строя таких соединений обязывают конструкторов иметь такие методы расчётов, которые наиболее полно отвечают реальным условиям эксплуатации.

В настоящей статье авторами продолжены исследования, описанные в работе [1], и приведены результаты исследования влияния вида напряжённого состояния на циклическую трещиностойкость заклёпочных соединений.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ

Анализ НДС элементов заклёпочных соединений планера ЛА и ГТД показывает, что в зо-

нах концентрации напряжений, как правило, реализуется плоское напряженное состояние, различные варианты которого наиболее полно возможно реализовать в экспериментах с использованием крестообразных образцов (рис. 1). Существующие методы расчёта позволяют обнаружить сдвиг максимума пластических деформаций с контура надреза.

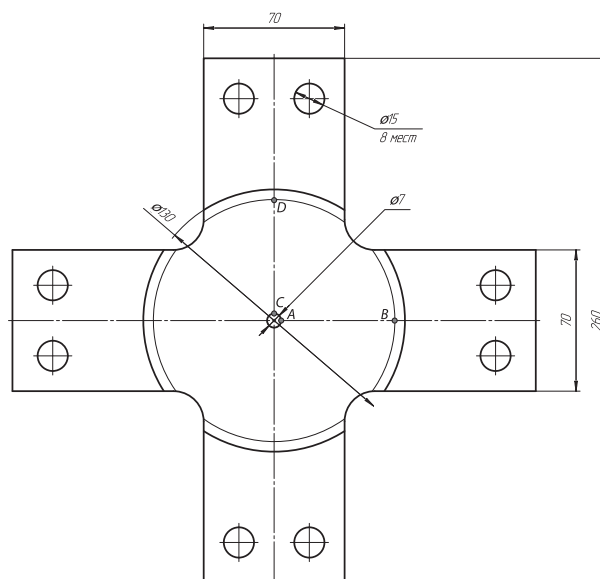
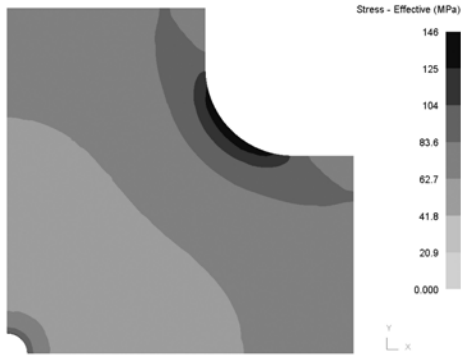


Рис. 1. Крестообразная модель для двухосного нагружения

При двухосном нагружении крестообразных образцов в рабочей области образца, в зонах, удаленных от концентратора напряжений отверстия, возникает линейное напряженное состояние, а при одноосном – плоское (рис. 2). В случае образца без отверстия в центре пластины формируется область однородного напряжённого состояния. Можно констатировать, что в области, представляющей собой квадрат со сторонами примерно 50 мм, напряжения можно принять практически постоянными и равными их значению в центре образца. Возмущения ком-

понтент напряжённо-деформированного состояния, вносимые наличием отверстия, не распространяются за пределы указанной области однородного напряжённого состояния, что позволяет выделить её для дальнейшего исследования уже методом конечных элементов.



а



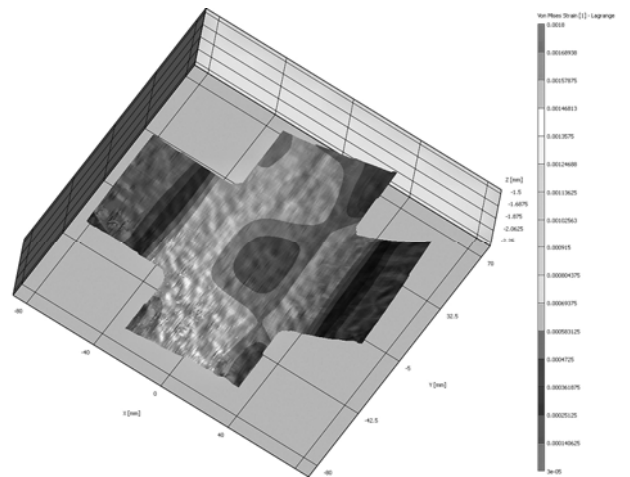
б

Рис. 2. Интенсивности напряжений в пластине с отверстием при: *а* – двухосном, *б* – одноосном нагружении

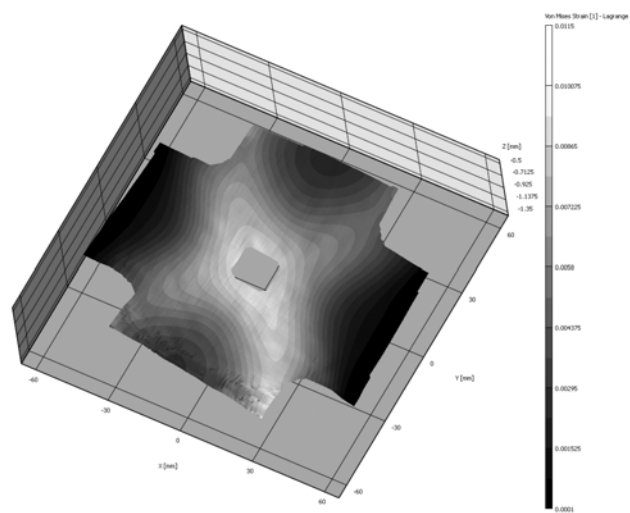
Для экспериментального исследования деформированного состояния пластин при одноосном нагружении использовалась система оптического измерения поверхностных деформаций Correlated Solutions Vic3D. Данная система измеряет деформации на поверхности образцов с помощью предварительно нанесенной на поверхность образца контрастной реперной сетки. В данном эксперименте образец был сначала окрашен матовой белой краской, после чего на данную поверхность были нанесены черные контрастные точки размером не более 0,1 мм. Для анализа получаемых оптическим методом деформаций были использованы численные модели процесса. Конечно-элементное моделирование проводилось в расчетном комплексе STFC Deform.

Оценка деформаций производилась на трех видах пластин из материала Д16Т – без концентратора напряжений, со сквозным отверстием и с заштифованным отверстием. Нагружение производилось путем постепенного увеличения силы на образцах до 50 кН. Система оптического измерения состоит из двух видеокамер высокого разрешения, фиксирующих изображения с заданной скоростью.

Распределение интенсивностей деформаций в пластине без отверстия и с отверстием, полученное в Vic3D, показано на рис. 3. На пластине без концентратора видна существенная несимметричность в полях деформаций, связанная с ошибками вычислений. Существенное влияние на ошибку расчетов в Vic3D оказывает точность идентификации реперных точек.



а



б

Рис. 3. Поля интенсивности деформаций в пластине, полученные в Vic3D: *а* – без отверстия, *б* – с отверстием

Также на трехмерной проекции пластины видно, что пластина имеет некоторые искривления в поперечном плоскости пластины направлении. Данные искажения формы вызваны технологическим процессом получения данных деталей, а также незначительными перекосами в ходе приложения нагрузки к образцу. Однако величина данных отклонений от прямолинейности достаточно мала и находится в диапазоне 0,4 мм, в соответствии с данными измерений оптическим способом. Ввиду ограничений расчетной модели, методами Vic3D непосредственное измерение деформаций в зоне самого концентратора невозможно, данная зона автоматически расширяется программным комплексом на расстояние порядка характерного размера концентратора.

На рис. 4 показаны поля сдвиговых деформаций ϵ_{xy} в пластине с отверстием, полученные при конечно-элементном моделировании в STFC Deform и расчетным путем в Vic3D. Видно, что в зоне отверстия неравномерность деформаций, полученных оптическим методом, полностью отсутствует. Основной вклад в деформацию этой зоны вносят только значительные изменения формы детали в углах крестообразного образца.

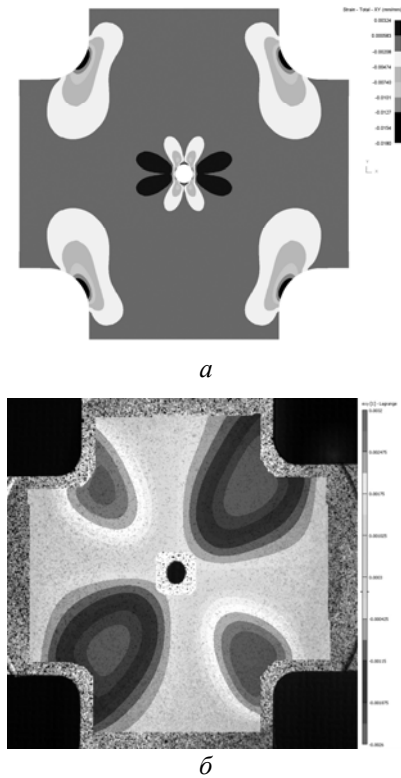


Рис. 4. Поля деформаций ϵ_{xy} в пластине с отверстием: *а* – моделирование в STFC Deform, *б* – расчет в Vic3D

Полученные оптическим методом поля деформаций не отражают вклад концентратора в напряженно-деформированное состояние образца. Данный эффект вызван по всей видимости применением «сглаживающих» фильтров в расчетной модели Vic3D. Одним из вариантов повышения точности расчета деформаций в данной зоне с использованием Vic3D является заполнение отверстия материалом с меньшей жесткостью, чем материал исходного образца.

На рис. 5 показано сравнение полей интенсивности деформаций в пластине с отверстием. Поля деформаций в зоне концентратора также существенно отличаются в представленных вариантах.

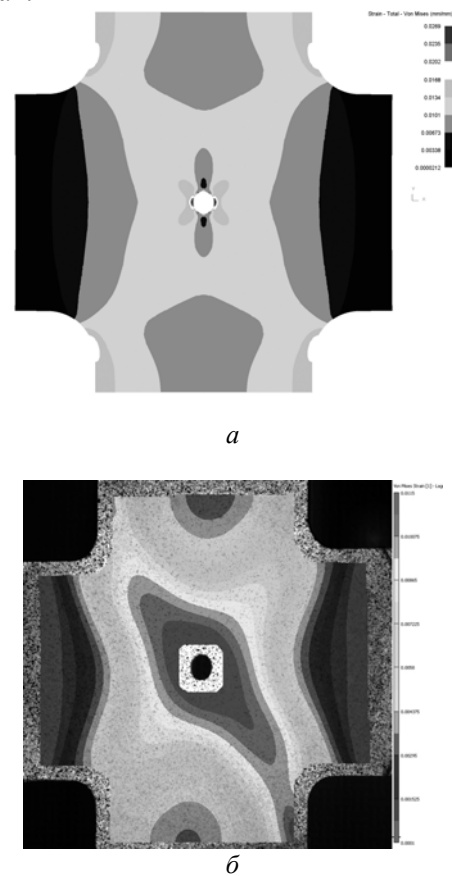
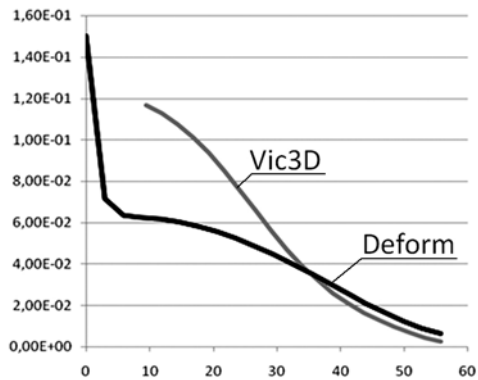


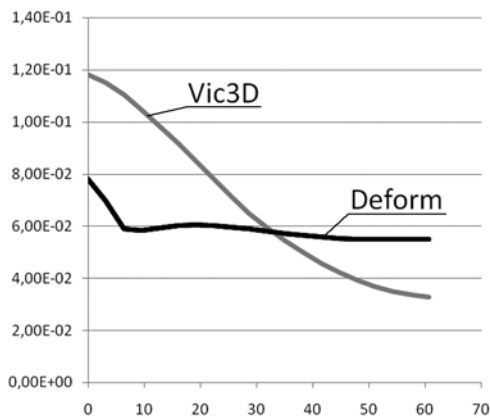
Рис. 5. Поля интенсивностей деформаций в пластине с отверстием: *а* – моделирование в STFC Deform, *б* – расчет в Vic3D

Однако существенный вклад периферийных деформаций в деформированное состояние образца в рабочей части может быть объяснен тем, что при моделировании не учитывалась геометрия образца в местах уширений под захваты испытательной машины. Увеличение жесткости пластины в этих местах также приводит к изменению характера распределения деформаций при одноосном нагружении. На графиках (рис. 6) показано сравнение интенсивности деформаций по отрезкам *AB* и *CD* (см. рис. 1). В зоне концентратора, при численном моделиро-

вании процесса нагружения, имеет место существенный рост деформаций. Деформации, посчитанные в Vic3D, демонстрируют более осредненные значения по данным направлениям, при совпадении диапазонов численных значений деформаций.



а



б

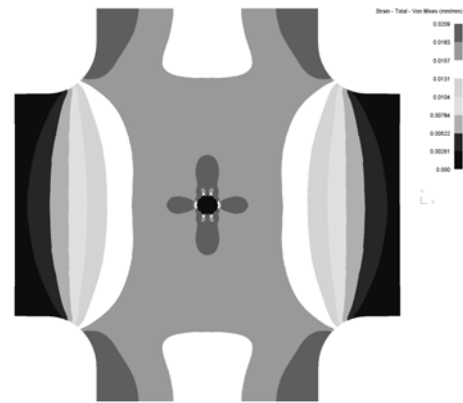
Рис. 6. Сравнение интенсивностей деформаций в пластине с отверстием:

а – в направлении поперек,
б – в направлении вдоль оси нагружения
(на секторе в 1/4 часть образца)

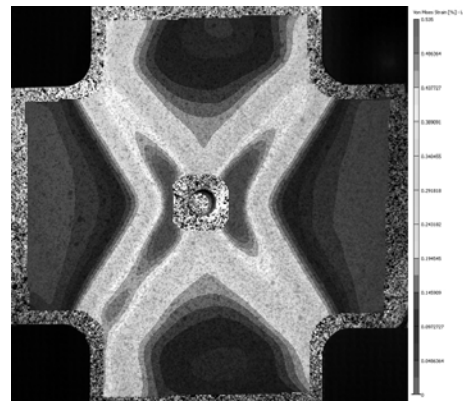
На рис. 7 показаны поля интенсивностей деформаций, возникающие в заштифованной пластине. На картине деформаций, полученных оптическим методом, также прослеживается существенное влияние периферийных зон деформаций.

Полученные в ходе эксперимента результаты не позволяют произвести более корректное сравнение деформаций, полученных оптическим и численным методом, ввиду того, что при численном моделировании деформация рассчитывается в идеализированных условиях плоской постановки задачи, а деформации, полученные в

оптическом методе, рассчитываются на криволинейной поверхности (см. рис. 3) образца.



а



б

Рис. 7. Поля интенсивностей деформаций в пластине со штифтом: а – моделирование в STFC Deform, б – расчет в Vic3D

ИСПЫТАНИЯ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

Испытания проводились на специальных установках и по методике, разработанной авторами, описанных в работах [2, 3]. Испытания проводились в условиях малоциклового нагружения с частотой 0,13 Гц и при максимальном и минимальном напряжениях цикла соответственно равными 0,7 и 0,1 от σ_B материала. Нагрузка в обоих направления была синфазной и асимметричной с коэффициентом асимметрии $R = 0,14$.

Программа экспериментов состоит в циклическом синусоидальном двухосном растяжении при различных отношениях приложенных нагрузок $\lambda = 1; 0,75; 0,5$ с регистрацией роста усталостной трещины микроскопом МИР-2 с 24-кратным увеличением. В процессе экспери-

мента одновременно фиксируются длина трещины и соответствующее ей число циклов. Точность измерения длины трещины составляла 0,025 мм.

Для выявления влияния степени натяга в точечном (заклёпочном) соединении на скорость роста трещины были испытаны образцы с отверстием, заполненным цилиндрическим штифтом из стали 30ХГСА (HRC 38...42), который имитировал, таким образом, заклёпку. Вид образца, закреплённого для испытаний на установке, представлен на рис. 8.

Радиальные натяги от 1% до 4% создавались штифтом, диаметр которого был больше, чем диаметр отверстия. Величина натяга определялась отношением:

$$\Delta = \frac{d_3 - d_0}{d_0} \times 100\%,$$

где d_0 – диаметр отверстия в образце; d_3 – диаметр заклёпки.

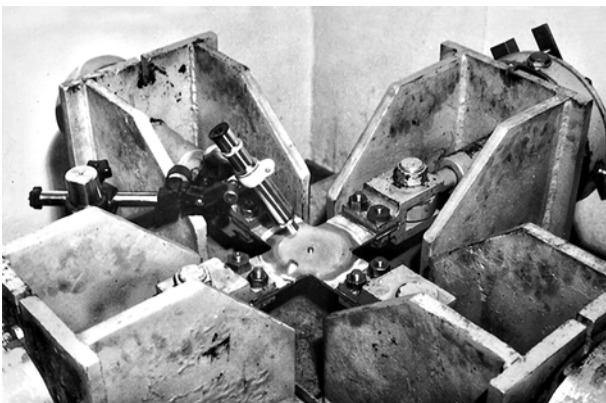


Рис. 8. Образец с имитатором заклёпки на установке (виден микроскоп для замера длины трещины)

Диаметры отверстий (выполненных из-под развёртки) и штифтов контролировались.

Так как все данные по выносливости и трещиностойкости точечных заклёпочных соединений получены в основном на стандартных испытательных установках, позволяющих проводить только одноосное нагружение образцов, а в реальных авиационных и аэрокосмических конструкциях такие условия встречаются крайне редко, нами были проведены экспериментальные исследования точечных заклёпочных соединений при двухосном нагружении, создающем наиболее распространённые условия эксплуатации точечных соединений. При этом в образце создаётся плоское напряжённое состояние, которое характерно для обшивки и фюзеляжа самолёта, дисков компрессора и турбины ГТД, сосудов давления, трубопроводов и др.

С целью выяснения влияния способа испытаний на выносливость и трещиностойкость то-

чечных заклёпочных соединений были проведены также сравнительные испытания при одноосном и двухосном нагружении плоских крестообразных образцов из материалов Д16-АТ и ОТ-4. Результаты испытаний представлены на рис. 9.

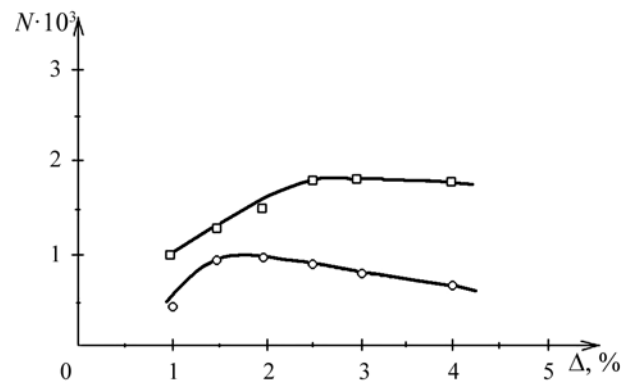


Рис. 9. Зависимость числа циклов нагружения до момента зарождения трещины от величины натяга Δ при различных λ :

○ – $\lambda = 0$ (одноосное нагружение), □ – $\lambda = 1$

На графике хорошо видно, что при испытаниях при одноосном нагружении число циклов до момента зарождения трещины значительно меньше (до 50%), чем при двухосном нагружении при всех исследуемых значениях натяга. Таким образом, можно сделать вывод, что для того чтобы иметь достоверные экспериментальные данные о выносливости точечных заклёпочных соединений, необходимо проводить испытания при двухосном нагружении.

При исследовании влияния степени натяга в точечном соединении при двухосном нагружении выявлено, что увеличение натяга Δ от 0% до 2,5% способствует увеличению числа циклов нагружения до момента зарождения усталостной трещины в 1,5...2 раза. При дальнейшем увеличении натяга Δ увеличения числа циклов нагружения до момента зарождения трещины не происходит, то есть экспериментально установлена оптимальная степень натяга для точечных заклёпочных соединений, что также хорошо видно на рис.9.

В процессе испытаний при соответствующей наработке и соответствующих условиях нагружения происходило дальнейшее развитие трещины с неизбежным выпадением имитатора заклёпки.

После выпадения имитатора характер роста усталостной трещины был идентичен характеру роста усталостной трещины в образцах с незаполненным отверстием.

ВЫВОДЫ

1. Деформированное состояние крестообразных образцов при одноосном нагружении, полученное в Vis3D позволяет с достаточной точностью определять деформации, возникающие в реальном образце, однако для получения более достоверных результатов в малых зонах концентраторов напряжений необходимо проведение дополнительных исследований.

2. Экспериментально установлено, что скорость роста усталостной трещины у образцов с заполненным отверстием (с натягом) ниже, чем у образцов, имеющих свободное отверстие. Это связано с действием сжимающих остаточных напряжений, возникающих при постановке стержня имитатора заклёпки в гладкое отверстие с натягом.

3. На основании проведённых экспериментальных исследований плоских крестообразных образцов с заполненным отверстием (штифт из стали 30ХГСА – имитатор заклёпки) из сплавов Д16-АТ и ОТ-4 установлено, что увеличение натяга в соединении приводило к существенно-му снижению скорости роста трещины.

4. Полученные экспериментальные данные по малоциклового усталостному разрушению, а также результаты исследований по циклической трещиностойкости, их анализ и обобщение являются основными исходными данными при проектировании как заклёпочных соединений, так и деталей ГТД и ЛА, испытывающих большие механические нагрузки при переходных состояниях, например во время пуска и останова, которые могут вызвать значительное накопление повреждений всего лишь после нескольких сот или нескольких тысяч циклов нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сабиров Р. М., Жернаков В. С.** Экспериментальное исследование циклической трещиностойкости заклёпочных соединений упрочнённых механической обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. М.: Машиностроение, 2006. №1. С.7–8.

2. Установка для испытаний плоских образцов на усталость при двухосном нагружении / Р. М. Сабиров, В. С. Жернаков, Ю. Г. Рысь, А. А. Закрытый // Заводская лаборатория. 1986. №6. С.84–85.

3. **Жернаков В. С., Сабиров Р. М.** Исследование развития трещин в условиях плоского напряжённого состояния при малоциклового нагружении // Прочность элементов авиационных конструкций: Межвуз. науч. сб. Уфа, 1988. №2. С.18–22.

ОБ АВТОРАХ

Жернаков Владимир Сергеевич, проф., зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.

Ермоленко Анатолий Николаевич, ст. преп. той же каф. УГАТУ. Дипл. инж. (УГАТУ, 2003). Канд. техн. наук по динамике и прочности машин и аппаратов (2009). Иссл. в обл. упругости, пластичности на основе современных программно-вычислительных комплексов.

Сабиров Роберт Мухсинович, инж. той же каф. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1974). Иссл. в обл. усталостной прочности материалов и конструкций.