



Ахметзянов Марат Халикович родился в 1932 г., окончил с отличием в 1951 г. железнодорожный техникум, а затем – строительный факультет Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта. С 1956 г. работает в НИИЖТе на кафедрах строительной механики и теоретической механики. С 1974 по 1983 г. был проректором по научной работе института. Специалист в области экспериментальных методов механики деформируемого тела, доктор технических наук (1970), профессор (1971), лауреат Государственной премии СССР (1980), заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1962), действительный член Академии транспорта РФ, член-корреспондент Академии наук высшей школы. Опубликовал более 150 научных статей, несколько монографий, учебников и учебных пособий.

УДК 624.04:930.24

М.Х. АХМЕТЗЯНОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КАФЕДРЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

Памяти дорогого Учителя
профессора А.Я. Александрова

Излагается развитие экспериментальных методов механики твердого деформируемого тела на кафедре строительной механики в 1947–2007 гг.

Экспериментальные исследования были начаты сразу же после прихода Абрама Яковлевича Александрова на кафедру строительной механики в 1947 г. Ему в то время было всего 32 года, но это уже был крупный исследователь, успешно защитивший докторскую диссертацию по решению сложных контактных пространственных задач теории упругости. И хотя круг его научных интересов определялся областью расчетных методов механики твердого деформируемого тела, он сразу же начал активно заниматься развитием лаборатории кафедры. В первые годы был существенно пополнен парк машин для механических испытаний материалов и создана лаборатория фотоупругости. Этот метод только начинали применять для исследования упругих задач в лабораториях Ленинградского университета и Института машиноведения АН СССР. В первых работах А.Я. Александров вместе со своими учениками применил метод фотоупругости для исследования контактных задач механики грунтов [1] и для определения распределения давлений в поршневых кольцах [2]. С этой целью были разработаны оригинальные датчики давлений из фотоупругого материала. В 1952 г. Абрам Яковлевич публикует работу под названием «Об одной возможной схеме применения метода фотоупругости к исследованию...» [3], которая послужила началом весьма крупного направления в работе кафедры и лаборатории. В этой статье автор предложил наклеивать на поверхность исследуемых элементов тонкие слои из оптически чувствительных материалов, которые, деформируясь вместе с элементом, покажут в отраженном свете распределение деформаций на исследуемой поверхности. По существу такой слой эквивалентен множеству датчиков деформаций с практически нулевой базой, и он дает поле деформаций. Однако сразу реализовать эту весьма привлекательную схему не удалось из-за отсутствия в ту пору материалов и клеев, которые должны сохранять сцепление с конструкционным материалом до требуемых

деформаций. В конце 50-х гг., после появления материалов на основе эпоксидных смол, метод фотоупругих покрытий начали интенсивно развивать, отрабатывалась техника эксперимента, создавалась аппаратура для работы в отраженном свете, способы обработки оптических картин и разделения деформаций. Уже на втором Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике был сделан доклад «Исследование упругопластических задач методом фотоупругих покрытий» [4]. Доклад вызвал большой интерес многих участников съезда. Отмечу, что коллектив кафедры и лаборатории не только неизменно участвовал в работе всех девяти съездов, но и обязательно представлял на них свои доклады [5].

Проблема определения напряжений в пластической области особенно трудна при сложном характере деформирования детали. Один из методов решения этой задачи предложил А.Я. Александров в своей работе [3]. В последующем были разработаны и другие методы. Одним из наиболее строгих является метод воспроизведения истории деформирования [6]. Для этого на трубчатые образцы наклеивались фотоупругие датчики деформаций. Образцы растягивались с одновременной подачей внутреннего давления. Таким образом подбиралась история деформирования, зафиксированная в исследуемой точке детали при сложном нагружении. По замеренным в процессе деформирования образца усилиям определялась история нагружения.

Параллельно, с участием лабораторий Сибирского научно-исследовательского института авиации разрабатывалась методика исследования оболочек [7, 8] и самолетных конструкций. Основным разработчиком этого направления в СибНИА А.С. Ракин стал позднее доктором технических наук.

На базе метода фотоупругих покрытий были созданы методики исследования больших деформаций. В развитии данного направления участвовали Г.Н. Албаут и В.Н. Барышников [9]. Для этого использовались прозрачные резиноподобные материалы и нелинейная теория упругости для описания их механического поведения до деформаций порядка 100 % и выше.

На базе фотоупругих покрытий была создана методика исследования остаточных напряжений в телах такой сложной формы, как железнодорожный рельс [10, 11]. В конце 60-х гг. в СССР начали производить объемно-закаленные рельсы. В первых партиях таких рельсов появились большие остаточные после термообработки и правки напряжения. Были случаи самопроизвольного растрескивания рельсов. Для уменьшения этих напряжений необходимо было прежде всего знать распределение этих напряжений по всему объему рельса. Таких методов определения напряжений в то время не было. Наша лаборатория взялась за решение этой задачи. Была разработана схема исследования, которая потребовала вырезки из рельса темплета с замером деформаций на его контуре при помощи заранее нанесенных покрытий, последующего определения оставшихся напряжений в вырезанном темплекте и, наконец, разрезки всего рельса на отдельные полосы с определением продольных деформаций в них. Эта трудоемкая схема была использована для осуществления отработки режимов закалки и правки рельсов. Этими исследованиями занимались талантливые инженеры В.А. Кушнеров, Ф.Ф. Плешаков и др. Параллельно в других организациях использовались иные приближенные методы, в том числе и в ВНИИЖТе. Однако специалистами наша схема была признана образцовой, по ней оценивались все приближенные способы.

При помощи очень тонких фотоупругих покрытий Л.А. Краснову и А.П. Шабанову удалось изучить распределение деформации в отдельных зернах металла [12, 13, 14]. Эти результаты имели фундаментальное значение для физики металлов и стали прообразом работ в области нанотехнологий.

Фотоупругие датчики деформаций были успешно применены для измерения температурных усилий в рельсах бесстыкового пути [15, 16], в отличие от тензодатчиков эти датчики не реагируют на изменение температуры рельса, а оптическая разность хода в них пропорциональна температурному усилию в рельсе.

Результаты всех этих исследований были обобщены в монографии «Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела», которая вышла в издательстве «Наука» в 1973 г. После выхода этой монографии кафедру строительной механики и лабораторию прочности НИИЖТа стали считать не только в СССР, но и за рубежом центром развития оптических методов механики деформируемого тела. Одновременно с развитием экспериментально-расчетных работ шла подготовка научных кадров. Под руководством профессора Александра защитили кандидатские диссертации инженеры Л.А. Краснов, В.А. Кушнеров, С.П. Васильев и многие др., автор данной статьи защитил в 1970 г. докторскую диссертацию, а В.Н. Агуленко в своей кандидатской диссертации использовал метод составных моделей для исследования контактных задач в рельсах. Эта проблема стала в последнее время весьма актуальной в связи с резким нарастанием износа колес подвижного состава и рельсов. По разработанной в нашей лаборатории методике можно количественно оценить различные предложения по изменению профилей поверхностей катания колес и рельсов. Поляризационно-оптический метод является единственным методом, который позволяет определять напряжения во внутренних точках модели, т. е. решать пространственные задачи механики деформирования.

В 1980 г. авторы цикла работ по развитию экспериментальных методов исследований задач прочности были удостоены Государственной премии СССР. В состав творческого коллектива от нашего института вошли А.Я. Александров и М.Х. Ахметзянов.

В журнале ПМТФ в 1967 г. была опубликована этими авторами первая работа по использованию лазеров в методе фотоупругости [18]. Эти источники монохроматического света обладают высокой пространственной и временной когерентностью, что позволяет достаточно просто получать интерференционные картины при деформировании тел. После появления первых работ появилось большое количество трудов по голографической интерферометрии. Многие авторы, словно соревнуясь друг с другом, писали о блестящих многообещающих возможностях метода голографической интерферометрии, ежегодно проводились симпозиумы, посвященные этим вопросам, конференции и семинары, издавались книги и учебники. Однако со временем поток этих восторгов стал постепенно стихать. Многие исследователи не смогли преодолеть трудности эксперимента, связанные главным образом с исключительно высокой чувствительностью методов голографии к перемещениям исследуемого объекта, в том числе к перемещениям его как жесткого целого.

В НИИЖТе была создана группа в составе лаборатории прочности по развитию голографических методов определения деформаций и перемещений. В

эту группу входили В.А. Жилкин, С.И. Герасимов, А.М. Попов, Л.А. Борыняк, В.П. Кутовой, В.Б. Зиновьев, А.П. Устименко и др. Докторская диссертация В.А. Жилкина была посвящена одновременному использованию методов фотоупругих покрытий, муаровых полос, спекл-интерферометрии и голографической интерферометрии. Защита состоялась уже после внезапной кончины Абрама Яковлевича в 1983 г.

Исключить влияние перемещений объекта как жесткого целого и выделить деформационную составляющую удалось с помощью накладного голографического интерферометра. Его разработкой и практическим опробованием занимались Л.А. Борыняк и С.И. Герасимов, применившие накладные голографические интерферометры для исследования упругопластических задач при статическом и малоцикловом нагружениях, а также для неразрушающего контроля объектов с подповерхностными дефектами. Голограммы фиксировались в отраженном свете [19, 20, 21]. Эта оригинальная методика по своим возможностям напоминала метод фотоупругих покрытий.

Методы панорамной голографии, позволяющей получать поля перемещений на поверхности цилиндрических и конических оболочек, были развиты в работах Л.А. Борыняка и А.П. Устименко.

Один из первых моих аспирантов А.М. Попов занимался развитием метода муаровых полос. В этом методе используются растры — решетки, состоящие из чередующихся светлых и темных полос с определенным шагом. Для исследования распределения деформаций в зонах концентрации напряжений требуются растры с малым шагом. Механическим способом можно изготовить растры с шагом порядка 30–40 линий на миллиметр. Используя достижения голографической интерферометрии, А.М. Попов получил растры порядка 1000 линий на один миллиметр, что позволило ему провести исследование полей деформаций у острых концентраторов типа малых отверстий, трещин и разрезов [22, 23, 24]. По результатам этих исследований он успешно защитил докторскую диссертацию.

Для исследования пространственных задач теории упругости используются несколько методик. Две из них связаны с выделением отдельного слоя модели. Эти методы трудны при их реализации. Намного заманчивее было просветить пространственную модель на всю ее толщину и по интегрально полученной картине определить ее напряженное состояние. Однако так решить задачу можно только в том случае, когда известно распределение напряжений на пути просвечивания. Но если математически обработать результаты просвечивания модели под разными углами (многолучное просвечивание), то в некоторых случаях в ней удастся определить распределение напряжений. Это можно сделать посредством методов фазовой интерферометрии [25, 26, 27]. Такие исследования легли в основу докторской диссертации В.П. Кутового на степень доктора физико-математических наук. На кафедре также успешно развивались методы моделирования. В основу кандидатской диссертации В.Б. Геронимуса легли методы нелинейного подобия, которые расширили возможности экспериментаторов при моделировании. В этом случае исследования проводятся не на геометрически подобной модели, а на ее нелинейном аналоге, в котором масштабы моделирования являются функциями координат. Методы аффинного подобия применительно к температурным задачам, к нелинейным проблемам упругопластического деформирования развивал на кафедре С.Д. Клячко, также ставший доктором физико-математических наук.

Б.П. Чебаевский выполнил цикл исследований по восстановлению напряженного состояния зоны разрушения, используя для этого способы измерения твердости металла на разрушенной поверхности. Оказалось, что данная твердость зависит от максимально достигнутой интенсивности напряжений, что позволяет выяснить причины разрушения деталей или конструкций.

В последние годы на кафедре был выполнен цикл исследований по механике разрушения. Эта относительно молодая ветвь механики твердого деформируемого тела требовала создания своих экспериментальных методов, которые развивались в нашей лаборатории, несмотря на трудности проведения опытных работ в последние годы. Первые работы были выполнены В.М. Тихомировым и В.П. Тыриновым [28–31]. На прозрачной модели рельса ими были получены коэффициенты интенсивности напряжений около трещин, которые имитировались разрезами, проведены исследования плоских и пространственных задач механики разрушения. По результатам этих исследований В.П. Тырин защитил кандидатскую, а В.М. Тихомиров — докторскую диссертацию.

За последние годы окончили аспирантуру и успешно защитили кандидатские диссертации Игнатъев, Черновол, Брюховецкая, Шеффер и другие соискатели.

В заключение отметим, что высокий уровень экспериментальных исследований на кафедре строительной механики и в лаборатории прочности подтверждается тем, что практически все работы заканчиваются защитой кандидатских и докторских диссертаций. Только по экспериментальному направлению десять сотрудников кафедры стали докторами наук, а многие (около 30) — кандидатами технических наук.

Литература

1. *Исследование плоских контактных задач для грунтов методом фотоупругости* / А.Я. Александров, Б.Ф. Монахов, С.Д. Клячко, Б.Я. Пресников // Тр. НИИЖТа. Новосибирск, 1955. Вып. 11. С. 89–102.
2. Александров А.Я., Монахов Б.Ф. Определение давления поршневых колец на стенки цилиндра методом фотоупругости // Тр. НИИЖТа. Новосибирск, 1952. Вып. 8. С. 125–130.
3. Александров А.Я. Об одной возможной схеме применения метода фотоупругости к исследованию плоских упругопластических задач // Тр. НИИЖТа. Новосибирск, 1952. Вып. 8. С. 89–95.
4. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Исследование упругопластических задач методом фотоупругих покрытий // Тр. 2-го Всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике (обзорные доклады). М.: Наука, 1966. Вып. 3. С. 38–48.
5. *Материалы* 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 съездов по теоретической и прикладной механике.
6. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Исследование неупругих задач путем воспроизведения истории деформирования. ДАН СССР. 186. 1969. Т. 1. С. 58–61.
7. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х., Ракин А.С. Исследование упругопластического деформирования оболочек с вырезами и усилениями методом фотоупругих покрытий // Прикладная механика. 2. 1966. № 3. С. 1–9.
8. Александров А.Я., Ракин А.С., Романов В.М. Применение метода фотоупругих покрытий для исследования напряжений в тонкостенных натурных конструкциях // Тр. 7-й Всесоюзной конференции. Таллин, 1971. С. 168–174.
9. *О поляризационно-оптических исследованиях при больших деформациях* / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов, Г.Н. Албаут, В.Н. Барышников // ПМТФ. 1969. № 5. С. 89–99.
10. Ахметзянов М.Х. Исследование остаточных напряжений в цилиндрических телах // Заводская лаборатория. 33. 1967. № 1. С. 91–94.
11. Ахметзянов М.Х. Определение напряжений методом разгрузки при моделировании задач пластичности и ползучести // Прикладная механика. 4. 1968. № 2. С. 9–15.
12. Александров А.Я., Краснов Л.А., Кушнеров В.А. Исследование деформаций в микрорегионах при помощи фотоупругих покрытий // ПМТФ. 1967. № 3. С. 126–130.

13. Александров А.Я., Краснов Л.А., Кушнеров В.А. Исследование ранних стадий усталостного разрушения металлов при помощи фотоупругих покрытий. ДАН. 191. 1970. № 2. С. 126–130.
14. Краснов Л.А., Кушнеров В.А., Шабанов А.П. Исследование деформаций зерен металла при ползучести методом фотоупругих покрытий // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений / НИИЖТ. 1980.
15. Ахметзянов М.Х. Осдвиговой чувствительности фотоупругих датчиков // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1966. № 8. С. 67–70.
16. Ахметзянов М.Х., Тихомиров В.М., Шабанов А.П. Применение фотоупругих датчиков для измерения температурных усилий в рельсах бесстыкового пути // Строительная механика и инженерные сооружения / СГУПС. Новосибирск, 1995. С. 4–11.
17. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1970. 576 с.
18. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. О применении лазеров для раздельного определения напряжений при поляризационно-оптических исследованиях // ПМТФ. 1967. № 5. С. 180–184.
19. Герасимов С.И., Жилкин В.А. Исследование деформаций поликристаллических образцов методом накладной голографической интерферометрии // ПМТФ. 41. 2000. № 1. С. 218–222.
20. Жилкин В.А., Герасимов С.И. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного голографического интерферометра // Ж. техн. физ. 52. 1982. № 10. С. 2079–2085.
21. Герасимов С.И., Жилкин В.А. Накладная голографическая интерферометрия непрозрачных объектов при низких температурах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 1. С. 63–69.
22. Жилкин В.А., Попов А.М. Определение трех компонент тензора деформаций по данным только одного деформированного раstra // Проблемы прочности. 1977. № 5. С. 5–11.
23. Жилкин В.А., Попов А.М. Голографический муаровый метод // Заводская лаборатория. 45. 1979. № 11. С. 7–12.
24. Жилкин В.А., Попов А.М. Методы двойного и голографического муара // Вестн. СГУПС. 1999. № 1. С. 8–20.
25. Kutovoy V.P. Influence of stress gradient on a stress-strain determination of three-dimensional bodies by holographic interferometers. Interferometry 94. Photo mechanics, Proceedings SPIE, Bellingham. 1994. Vol. 2342. P. 232–237.
26. Кутовой В.П. К исследованию пространственных задач методами голографической интерферометрии и инверсии в оптически слабо анизотропной и изотропной средах // Сб. науч. тр. «Расчетные и экспериментальные методы механики деформированного тела» / СГУПС. Новосибирск, 1998. С. 56–63.
27. Кутовой В.П. Исследование погрешностей определения первого инварианта тензора напряжений методами голографической интерферометрии и инверсии // Вестн. СГУПС. 2002. Вып. 4. С. 73–81.
28. Тихомиров В.М., Тырин В.П. Использование метода рассеянного света для определения коэффициента интенсивности напряжений К-111 в трехмерных задачах // ПМТФ. 1990. № 3. С. 167–170.
29. Тихомиров В.М. Определение коэффициентов интенсивности напряжений методом фотоупругости в трехмерных задачах механики разрушения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 2. С. 94–100.
30. Ахметзянов М.Х., Тихомиров В.М., Суровин П.Г. Определение коэффициентов интенсивности напряжений при смешанном типе нагружения трещины // Изв. вузов. Сер. Строительство. 2003. № 1. С. 19–25.
31. Ахметзянов М.Х., Тихомиров В.М. Контактно-усталостные дефекты в железнодорожных рельсах // Вестн. СГУПС. Новосибирск, 2005. № 12. С. 5–21.